

SERIE A, N°236.

N° D'ORDRE

837.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. L. HOULLEVIGUE,

Maitre de Conférences à la Faculté des Sciences de Lyon.

1^{re} THÈSE. — DE L'INFLUENCE DE L'AIMANTATION SUR LES
PHÉNOMÈNES THERMO-ELECTRIQUES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 26 juin 1895, devant la Commission d'Examen.

MM. TROOST, *Président.*

LIPPMANN,

BOUTY,

Examineurs.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1895



Digitized by the Internet Archive
in 2026

SÉRIE A, N° 236.

N° D'ORDRE

887.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR

M. L. HOULLEVIGUE,

Maitre de Conférences à la Faculté des Sciences de Lyon.

1^{re} THÈSE. — DE L'INFLUENCE DE L'AIMANTATION SUR LES
PHÉNOMÈNES THERMO-ÉLECTRIQUES.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 26 juin 1895, devant la Commission d'Examen.



MM. TROOST, *Président.*

LIPPMANN,

BOUTY,

} *Examineurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1895

ACADÉMIE DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

	MM.	
Doyen.....	DARBOUX, Professeur...	Géométrie supér.
Professeurs honoraires	PASTEUR.	
	DUCHARTRE.	
	DE LACAZE-DUTHIERS.	Zoologie, Anatomie. Physiol. comparée.
Professeurs.....	HERMITE.....	Algèbre supérieure.
	TROOST.....	Chimie.
	FRIEDEL.....	Chimie organique.
	TISSERAND.....	Astronomie.
	LIPPMANN.....	Physique.
	HAUTEFEUILLE.....	Minéralogie.
	BOUTY.....	Physique.
	APPELL.....	Mécanique rationn.
	DUCLAUX.....	Chimie biologique.
	BOUSSINESQ.....	Mécanique phys. et expérimentale.
	PICARD.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	POINCARÉ.....	Calcul des probabi- lités, Physique ma- thématique.
	YVES DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	BONNIER.....	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	DITTE.....	Chimie.
	MUNIER-CHALMAS.....	Géologie.
	GIARD.....	Évolution des êtres organisés.
	WOLF.....	Astronomie.
Professeurs adjoints..	CHATIN.....	Zoologie, Anatomie, Physiol. comparée.
	JOLY.....	Chimie.
	PELLAT.....	Physique.
	KOENIGS.....	Cinématique.
	PAINLEVÉ.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
Secrétaire.....	FOUSSEREAU.	

A

MONSIEUR E. BOUTY,

PROFESSEUR A LA SORBONNE.

A

MON PÈRE.

Hommage de reconnaissance et d'affection.

L. HOULLEVIGUE.

TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
TABLE DES MATIÈRES.....	IV
BIBLIOGRAPHIE.....	VII
INTRODUCTION HISTORIQUE.....	1
CHAPITRE I. — Relations entre les phénomènes thermo-électriques et leurs modifications produites par l'aimantation.....	6
§ I. Énoncé de la question.....	6
§ II. Définitions et conventions.....	6
§ III. Relations entre la force électromotrice et les diffé- rences de potentiel.....	7
§ IV. Relations de l'effet Peltier avec la force électromo- trice et les différences de potentiel.....	9
§ V. Effets Thomson.....	14
CHAPITRE II. — Variations de force électromotrice des éléments cuivre-fer doux et cuivre-acier doux placés dans un champ ma- gnétique. Pouvoirs thermo-électriques du fer et de l'acier.....	18
§ I. Nécessité de modifier les méthodes employées anté- rieurement.....	18
A. Étude du fer doux.....	18
§ II. Principe de la méthode.....	18
§ III. Description de l'appareil.....	19
§ IV. Marche d'une expérience.....	26
§ V. Résultats.....	28
B. Étude de l'acier doux.....	32
§ VI. Dispositif et méthode.....	32
§ VII. Résultats.....	35
§ VIII. Expression analytique des résultats.....	38
CHAPITRE III. — Influence de l'aimantation sur l'effet Peltier....	44
§ I. Principe de la méthode expérimentale employée....	44
§ II. Description de l'appareil.....	47
§ III. Marche d'une expérience.....	51
§ IV. Résultats.....	53
§ V. Évaluation de l'effet Peltier, tirée des forces électro- motrices. Comparaison avec les résultats précédents...	55
CHAPITRE IV. — Influence de l'aimantation sur les effets Thomson.	61
§ I. Expression du coefficient σ , tirée des mesures de force électromotrice.....	61
§ II. Expériences sur le coefficient λ pour le fer doux...	63
§ III. Évaluation du coefficient λ , tirée des mesures de force électromotrice.....	69
§ IV. Discussion des expériences de Sir W. Thomson....	69
CONCLUSIONS.....	73

BIBLIOGRAPHIE.

1° Influence de l'aimantation sur la résistance électrique.

- EDLUND, *Pogg. Annal.*, t. XCIII, p. 315; 1854.
W. THOMSON, *Philos. Transactions*, vol. III, p. 737; 1856.
BUTZ, *Pogg. Annal.*, t. CXXVIII, p. 202; 1866.
AUERBACH, *Philos. Magaz.*, 5^e série, t. VIII, p. 1, 138, 217.
BARRETT, *Philos. Magaz.*, 4^e série, t. XLVII; 1874.
WIEDEMANN, *Galvanismus*, t. II, p. 587.

2° Influence du magnétisme sur les réactions chimiques.

- ARNIUS, *Gilb. Annal.*, t. III, p. 59; t. V, p. 394, 1800; t. VIII, p. 279; 1801.
RITTER, *Beiträge*, t. II, p. 328; 1803.
MASCHMANN et HANSTEEN, *Gilb. Annal.*, t. LXX, p. 234; 1822.
SCHWEIGGER et DÖBEREINER, *Schweigg. Journ.*, t. LVI, p. 85; 1825.
RENDU, *Annales de Chim. et de Phys.*, t. XXXVIII, p. 196; 1828.
ERDMANN, *Schweigg. Journ.*, t. LVI, p. 24; 1829.
BRUNNER et MOUSSON, *Pogg. Annal.*, t. LXXIX, p. 141; 1850.
IRA REMSEN, *La lumière électrique*, t. IV, p. 126; 1881.
JUEPTNER, *La lumière électrique*, t. X, p. 469; 1883.
GROSS, *Wiener Sitzungsberichte*, 2^e série, t. XCII, p. 1373; 1885.
P. JANET, *Journ. de Phys.*, 2^e série, t. VI, p. 287, 1887, et t. VIII; 1889.
NICHOLLS et FRANKLIN, *Americ. Journ.*, 3^e série, t. XXXV, p. 290; 1888.
ROWLAND et BELL, *Americ. Journ.*, 3^e série, t. XXXVI, p. 39; 1888.
(Résumé, ainsi que le précédent, dans le *Journ. de Phys.*, 2^e série, t. VIII, p. 141.)
P. DUHEM, *Théorie nouvelle de l'aimantation par influence*, chap. VI.
G.-O. SQUIER, *Phil. Magaz.*, juin 1893.
HURMUZESCU, *Sur la force électromotrice d'aimantation. Journ. de Phys.*, 2^e série, t. XIV; 1895.

3° Influence de l'aimantation sur les phénomènes thermo-électriques.

- W. THOMSON, *Philos. Trans.*, t. III, p. 722; 1856.
STROUHAL et BARUS, *Ann. der Physik u. Chem.*, t. XIV, p. 54; 1881.
TROWBRIDGE et PENROSE, *Americ. Journ.*, t. XXIV; 1882.
GRIMALDI, *Società di Scienze, etc... di Palermo*, juin 1886, et *Journ. de Phys.*, p. 569; 1887.
CHASSAGNY, *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, 1^{er} mai 1893.
-

PREMIÈRE THÈSE.

DE

L'INFLUENCE DE L'AIMANTATION

SUR LES

PHÉNOMÈNES THERMO-ÉLECTRIQUES.

INTRODUCTION HISTORIQUE.

La question de savoir si l'aimantation peut modifier les phénomènes électriques, produits dans les milieux magnétiques, s'est posée à l'esprit de tous les physiciens; on trouvera, dans le *Traité d'Électricité* de Wiedemann (¹), le résumé des premières tentatives, aussi nombreuses que vaines, faites pour la résoudre.

Les premiers résultats incontestables sont dus à Sir W. Thomson, et datent de 1856. Depuis cette époque, les faits acquis ne permettent plus de douter que les propriétés électriques des corps ne soient modifiées par l'aimantation; mais la nature, les lois, et souvent même le sens de cette action sont encore inconnus. Toutefois, essayons d'indiquer rapidement les principaux résultats obtenus.

Ils se rapportent à trois sujets différents :

1° Modification de la résistance électrique. L'aimanta-

(¹) G. WIEDEMANN, *Die Lehre von Galvanismus*, 3^e édition, t. II, p. 775.

tion longitudinale détermine dans le fer doux et l'acier doux une augmentation de résistance, dans l'acier trempé une diminution.

2° Influence du magnétisme sur les réactions chimiques et sur la force électromotrice des piles hydro-électriques. Cette partie du sujet est la seule dont la théorie ait pu encore être abordée; ébauchée par Gross et M. P. Janet, elle a été complétée par M. P. Duhem, et en partie vérifiée par les expériences de MM. Remsen, Rowland et Bell, Squier et Hurmuzescu.

La conclusion de ces physiciens est que le fer aimanté est moins fortement attaqué par les acides que le fer neutre; autrement dit, que l'aimantation diminue la force électromotrice d'une pile hydro-électrique, si la substance magnétique forme l'électrode négative, et l'augmente si elle forme l'électrode positive.

3° Influence du magnétisme sur les phénomènes thermo-électriques. C'est à ce dernier sujet que se rapporte mon travail, et c'est le seul que je crois devoir développer au point de vue historique. Les physiciens qui s'en sont occupés sont d'ailleurs fort peu nombreux, au moins à ma connaissance; ce sont Sir W. Thomson, Strouhal et Barus, Trowbridge et Penrose, Grimaldi, Chassagny.

Les résultats obtenus par Sir W. Thomson sont consignés dans la troisième Partie de son célèbre Mémoire *On the Electrodynamie qualities of metals*. Le grand physicien anglais détermine le sens des courants thermo-électriques qui peuvent se produire entre deux parties d'un même métal inégalement ou différemment aimantées. Parmi les nombreuses expériences qu'il indique, je citerai seulement celles qui peuvent être comparées à mes propres déterminations.

a. Le courant thermo-électrique passe, à travers la partie chauffée, du fer neutre au fer aimanté longitudinalement. Pour le démontrer, Sir W. Thomson prend une

petite bobine pouvant glisser sur un fil de fer dont les deux extrémités sont reliées à un galvanomètre; la bobine est parcourue par un courant qui aimante le fil de fer, tandis qu'on chauffe celui-ci avec une lampe à alcool; il se produit un courant dans le sens que nous venons d'indiquer.

b. Il se produit un courant thermo-électrique, à travers la partie chauffée, du fer aimanté transversalement au fer doux. Pour manifester cet effet, Sir W. Thomson emploie une lame de fer enroulée en spirale et reliée à un galvanomètre. Il la soumet à l'action de deux gros barreaux aimantés ou d'un électro-aimant, de façon à l'aimanter transversalement; en même temps, toutes les spires d'un même côté sont chauffées, tandis que les autres sont refroidies. Il se produit un courant dans le sens indiqué ⁽¹⁾.

c. Il se produit un courant du fer aimanté transversalement au fer aimanté longitudinalement à travers la partie chaude. Ce fait, conséquence des deux précédents, est démontré par une expérience directe, d'un dispositif très compliqué, et que je crois inutile de décrire.

d. Il se produit un courant, à travers la partie chauffée, de l'acier doux à l'acier aimanté longitudinalement. Pour le montrer, on forme une pile avec 38 bouts de fil de cuivre et 39 bouts de fil d'acier, ceux-ci aimantés à un bout seulement; le tout est placé sur une monture en bois et relié à un galvanomètre; on chauffe en même temps les points correspondants des fils d'acier par immersion dans un bain d'huile, et il se produit aussitôt un courant dans le sens indiqué.

Toutes ces expériences, et celles que Sir W. Thomson

(¹) Ces deux résultats sont énoncés, mais en sens contraire, dans le résumé du Mémoire de Sir W. Thomson publié dans les *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3^e série, t. LIV, p. 115; 1858.

a effectuées sur le nickel et le cobalt, sont purement qualitatives.

Il en est autrement des résultats obtenus par Strouhal et Barus; ces physiciens mesurent la variation de force électromotrice éprouvée par une pile thermo-électrique fer-cuivre lorsqu'on l'aimante longitudinalement. La pile, longue de 400^{mm}, est placée suivant l'axe d'une bobine magnétisante ayant 223^{mm} de long; le champ produit par la spire dans le voisinage des soudures était de 35 C.G.S., mais il n'avait évidemment pas la même valeur dans les autres points du fil de fer, ce qui est un inconvénient de cette disposition expérimentale. L'une des soudures était placée dans du pétrole froid, l'autre était chauffée, soit dans un bain de pétrole pour les températures inférieures à 100°, soit dans la vapeur d'eau, ou la vapeur d'aniline, ou le plomb fondu. La force électromotrice de la pile thermo-électrique était mesurée par compensation avec une dérivation prise sur un daniell, la spirale magnétisante étant ou non parcourue par le courant. Strouhal et Barus trouvèrent ainsi que l'aimantation longitudinale a pour effet d'augmenter la force électromotrice d'une pile cuivre-fer. J'aurai l'occasion d'utiliser, dans le courant de cette étude, les résultats numériques de leurs expériences.

Je ne fais que citer en passant les expériences de Trowbridge et Penrose, qui n'ont obtenu que des résultats négatifs en essayant de manifester l'influence du magnétisme sur l'effet Thomson dans le fer; je passe également assez vite sur les expériences de Grimaldi; ce physicien a opéré sur un couple bismuth-cuivre dont une soudure était à 0° et l'autre à la température ambiante; il a trouvé que la force électromotrice diminuait par aimantation quand on employait le bismuth commercial, augmentait, au contraire, avec le bismuth pur. Pour une pile donnée, les résultats changent de grandeur, sans changer de sens,

avec son orientation par rapport au champ magnétique; mais ils changent tellement avec la nature chimique et la structure physique de l'échantillon employé, qu'il est impossible de tirer aucune relation générale des nombres donnés par M. Grimaldi.

Il n'en est pas de même des déterminations de M. Chasagny, qui paraissent échapper à toute critique. M. Chasagny détermine, comme Strouhal et Barus, l'influence de l'aimantation longitudinale sur la force électromotrice du couple fer-cuivre; mais, au lieu d'opérer dans un champ fixe et à des températures variables, il maintient toujours les soudures du couple à 0° et 100°, et fait varier le champ magnétique; celui-ci est déterminé par une spirale magnétisante ayant environ 50^{cm} de longueur, et dans laquelle sont complètement placées la pile thermo-électrique et les enceintes qui entourent les soudures.

Voici, du reste, la conclusion du travail de M. Chasagny :

« L'aimantation longitudinale détermine toujours une *augmentation* de force électromotrice du couple fer-cuivre; cette augmentation est indépendante du sens de l'aimantation. Pour des champs croissants, γ (l'augmentation de force électromotrice), d'abord proportionnel à l'intensité du champ, atteint, pour un champ de 55, un maximum qui est de 6,1 microvolts, et décroît ensuite lentement. Sa valeur est de 3,2 microv. pour un champ de 200...; cinq séries d'expériences ont donné des résultats entièrement concordants, la différence des déterminations analogues restant au-dessous de 0,3 microv. A ce degré de précision, en portant en abscisses les valeurs du champ, en ordonnées les valeurs de γ , celles-ci peuvent se représenter par une parabole d'axe incliné, que les nombres donnés plus haut suffisent d'ailleurs à déterminer. »

Les résultats que nous venons d'analyser, quelque intéressants qu'ils soient, sont isolés et sans lien; mon but,

en entreprenant la présente étude, a été d'obtenir un ensemble de résultats capable de fournir la loi empirique du phénomène pour les deux principaux corps magnétiques, le fer et l'acier, en attendant que le phénomène lui-même puisse être rattaché aux théories et aux lois générales de l'électricité et du magnétisme.

CHAPITRE I.

RELATIONS ENTRE LES PHÉNOMÈNES THERMO-ÉLECTRIQUES ET LEURS MODIFICATIONS PRODUITES PAR L'AIMANTATION.

§ I. Dans un circuit métallique hétérogène à température non uniforme, il y a lieu de considérer :

Des différences de potentiel ;

La force électromotrice ;

Des dégagements de chaleur aux soudures, ou effets Peltier ;

Des dégagements de chaleur en dehors des soudures, ou effets Thomson.

Le but du présent travail est de rechercher comment ces grandeurs sont modifiées par l'action d'un champ magnétique dans un circuit contenant du fer doux ou de l'acier doux (c'est-à-dire non trempé).

Mais il existe entre elles des relations nécessaires ; notre but, dans ce premier Chapitre, est d'en rappeler et d'en préciser le sens, et d'en déduire les relations qui existent entre les variations de potentiel, de force électromotrice, d'effets Peltier et d'effets Thomson, produites par aimantation ; nous établirons ainsi, dès l'abord, un lien théorique entre les différentes recherches expérimentales qui seront décrites dans les Chapitres suivants.

§ II. Auparavant, commençons par préciser la signification que nous attacherons, dans ce qui va suivre, à

certains termes et à certains signes que les physiciens n'emploient pas toujours dans le même sens :

1° Nous désignerons par $V_t(AB)$ la différence de potentiel qui existe à l'état statique entre les deux conducteurs A et B, à t^0 , c'est-à-dire le potentiel de B, moins celui de A.

2° Nous appellerons *force électromotrice* d'une pile thermo-électrique formée de deux métaux A et B la différence de potentiel, prise sur le métal A, que présentent à circuit ouvert les deux pôles de la pile, c'est-à-dire le potentiel du pôle le plus rapproché de la soudure chaude, moins le potentiel du pôle le plus rapproché de la soudure froide; elle est aussi égale au produit RI de la résistance par l'intensité comptée positivement du métal B vers le métal A, à travers la soudure chaude. Nous la désignerons par $E_t^T(AB)$; ainsi, pour une pile fer-cuivre, $E_0^{100}(CF)$ est négatif et égal à $-E_0^{100}(FC)$.

§ III. *Relation entre la force électromotrice et les différences de potentiel.* — La relation entre la force électromotrice d'une pile thermo-électrique et les différences de potentiel qui existent, à circuit ouvert, entre les soudures

$$(1) \quad E_t^T(AB) = V_t(AB) + V_T(BA),$$

a été souvent donnée, dans un aperçu simplifié des phénomènes, comme une conséquence du principe de Volta⁽¹⁾; on sait que rien n'est moins évident que cette relation, étant donnée l'existence des différences continues de potentiel qui caractérisent l'effet Thomson; elle a été également admise *a priori* par Clausius, dans une théorie inacceptable, puisqu'elle est contradictoire avec l'existence du point d'inversion.

Il se trouve cependant que cette relation est exacte,

(1) Voir MASCART et JOUBERT, *Électricité et Magnétisme*, t. I, p. 302.

comme l'a démontré M. Duhem ⁽¹⁾ : La force électromotrice d'une pile thermo-électrique est égale à la somme des différences de niveau potentiel correspondant aux diverses soudures de la chaîne.

De la relation (1) on peut déduire deux conséquences :

1° *La variation de force électromotrice d'un couple thermo-électrique par aimantation ne dépend que de l'élément magnétique du couple.*

Considérons, en effet, un circuit formé par un métal magnétique F, et deux métaux non magnétiques C et Z, placé dans un champ magnétique H uniforme en tous les points du métal F. Si tous les points du circuit sont à une même température T, on a nécessairement

$$V_T(FC) + V_T(CZ) + V_T(ZA) = 0.$$

De même, s'ils sont tous à t^0 ,

$$V_t(FC) + V_t(CZ) + V_t(ZA) = 0.$$

En ajoutant et tenant compte de la relation (1), on a

$$E_t^T(FZ) = E_t^T(FC) + E_t^T(CZ),$$

relation qui peut être considérée comme une conséquence immédiate de la loi des métaux intermédiaires de Becquerel.

Supposons maintenant que la force électromotrice d'un couple formé de deux métaux non magnétiques est indépendante du champ H ⁽²⁾. Alors, pour une variation du champ de zéro à H, on a

$$dE_t^T(FZ) = dE_t^T(FC).$$

Il suffira donc d'étudier l'influence du magnétisme sur

⁽¹⁾ P. DUHEM, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 6^e série, t. XII, p. 433; 1887.

⁽²⁾ J'ai vérifié approximativement cette proportion sur un couple zinc-cuivre, en me servant d'un dispositif qui sera décrit au Chapitre suivant.

un couple contenant le métal magnétique F, associé à un métal non magnétique, pour savoir comment se comportent tous les couples formés par F.

2° *Différence de potentiel entre un métal neutre et le même métal aimanté.*

Représentons par f le métal neutre et par F le même métal placé dans un champ H. On a, d'après la relation (1),

$$E_t^T(fC) = V_t(fC) + V_T(Cf),$$

$$E_t^T(FC) = V_t(FC) + V_T(CF).$$

D'où

$$V_T(Ff) = V_t(Ff) + [E_t^T(fC) - E_t^T(FC)].$$

Si t est une température fixe, $V_t(Ff)$ est une fonction de H seulement; $E_t^T(fC) - E_t^T(FC)$ est bien une fonction de T et de H qu'on pourra déterminer par expérience. On aura donc

$$(2) \quad V_T(Ff) = \varphi(H) + [E_t^T(fC) - E_t^T(FC)],$$

$\varphi(H)$ étant une fonction sur laquelle on ne sait rien, si ce n'est qu'elle s'annule pour $H = 0$.

§ IV. *Relations de l'effet Peltier avec la force électromotrice et les différences de potentiel.* — 1. Les physiciens sont aujourd'hui d'accord pour admettre la formule donnée pour la première fois par Sir W. Thomson

$$(3) \quad \varpi(AB) = \frac{T}{J} \frac{\partial}{\partial T} E_t^T(AB),$$

où $\varpi(AB)$ désigne le dégagement de chaleur (positif ou négatif) produit en une seconde par le courant 1 C.G.S., passant du métal A au métal B maintenus à la température absolue T, et J l'équivalent mécanique de la chaleur.

Toutes les démonstrations qu'on donne de cette formule reposent sur l'application du théorème de Carnot à un cycle convenablement choisi, et c'est là qu'est leur

point douteux, car les cycles employés ne sont pas réversibles, à cause de l'effet Joule et des quantités de chaleur qui se propagent par conductibilité le long du circuit; on peut, il est vrai, rendre le premier effet aussi petit qu'on le veut, à condition d'employer un couple fonctionnant dans des conditions convenables, mais on ne saurait appliquer le même raisonnement au second; aussi, dans les démonstrations données par les auteurs classiques en France, se contente-t-on de le passer sous silence.

Nous croyons qu'il vaut mieux, à l'exemple de Sir W. Thomson et de Maxwell, faire explicitement l'hypothèse qu'on peut raisonner sur les phénomènes réversibles considérés isolément comme s'ils constituaient par eux-mêmes un phénomène complet et indépendant des effets irréversibles, quitte à vérifier expérimentalement les résultats obtenus; or cette vérification a été faite d'une façon satisfaisante et pour un grand nombre de couples par Edlund, Bellati, Battelli et Jahn.

Quant à la formule établie par Lorentz (1)

$$(4) \quad \varpi(AB) = - \frac{T}{J} \frac{b}{\partial T} V_T(AB),$$

et qui relie l'effet Peltier aux différences de potentiel, elle repose, il est vrai, sur l'emploi d'un cycle entièrement réversible, mais, en revanche, elle introduit un certain nombre d'hypothèses sur la valeur desquelles on ne peut pas se prononcer, entre autres celles-ci, que la présence de conducteurs électrisés n'a pas d'influence sur la pression d'une masse gazeuse voisine, hypothèse qui paraît être contradictoire avec les expériences de Boltzmann et Quincke. Son exactitude serait donc douteuse si, en vertu

(1) A. LORENTZ, Sur l'application aux phénomènes thermo-électriques de la seconde loi de la Théorie mécanique de la chaleur. (*Archives néerlandaises des Sciences exactes et naturelles*, t. XX, 2^e livraison, p. 129).

de la relation (1), elle n'était identique à la formule de Thomson.

On a, en effet, en différenciant (1) par rapport à T ,

$$\frac{\partial}{\partial T} E_l^T(AB) = \frac{\partial T}{\partial} V_T(BA) = - \frac{\partial}{\partial T} V_T(AB).$$

2. On peut démontrer que la formule (3) de Thomson conserve la même forme, même lorsque le circuit thermo-électrique contient d'autres variations continues de potentiel que celles qui sont dues aux variations de température.

Supposons, par exemple, qu'entre deux points du circuit, distants de dl , existe une force électromotrice dh qui dépende de la différence de température dT et de la différence des champs magnétiques dm aux deux extrémités.

On a donc

$$dh = f(dT, dm),$$

relation qui peut s'écrire, en se limitant aux deux premiers termes du développement,

$$dh = \sigma dT + \lambda dm,$$

σ et λ étant des fonctions de T et de m .

La force électromotrice d'un couple dont les deux soudures sont aux températures absolues T_1 et T_2 est donc

$$E = H_1 + H_2 + \int dh,$$

ou bien

$$(5) \quad E = H_1 + H_2 + \int_{T_1}^{T_2} \Sigma \sigma dT + \int_{m_1}^{m_2} \Sigma \lambda dm,$$

H_1 et H_2 étant les forces électromotrices aux soudures quand le courant passe, qu'il faut se garder de confondre avec les variations de potentiel V_1 et V_2 qui existent à l'état statique, car nous avons vu que l'on a

$$E = V_1 + V_2.$$

Si $T_2 - T_1 = dT$, la relation (5) devient

$$(6) \quad dE = dH + \Sigma \sigma dT + \int_{m_1}^{m_2} \Sigma \lambda dm.$$

Appliquons le théorème de Carnot aux dégagements réversibles de chaleur produits dans le circuit; soit T une température intermédiaire entre T_1 et T_2 :

$$(7) \quad 0 = \frac{H_1}{T_1} + \frac{H_2}{T_2} + \int_{T_1}^{T_2} \Sigma \frac{\sigma dT}{T} + \int_{m_1}^{m_2} \frac{\Sigma \lambda dm}{T},$$

équation qui devient, en posant toujours $T_2 - T_1 = dT$,

$$(8) \quad 0 = d \frac{H}{T} + \Sigma \frac{\sigma dT}{T} + \frac{1}{T} \Sigma \lambda dm,$$

ou, en vertu de (6),

$$0 = d \frac{H}{T} + \frac{1}{T} (dE - dH),$$

ou enfin

$$H = T \frac{dE}{dT}.$$

L'effet Peltier vaut donc

$$\pi = \frac{H}{J} = \frac{T}{J} \frac{dE}{dT}.$$

Ce résultat est d'ailleurs conforme à celui que M. Duhem a déjà obtenu par une autre voie ⁽¹⁾.

3. La relation (3) permet de relier les variations d'effet Peltier aux variations de force électromotrice thermo-électriques produites par l'aimantation. On a en effet, dans un champ nul,

$$\pi(AB) = \frac{T}{J} \frac{\partial}{\partial T} E(AB),$$

et dans un champ H

$$\pi'(AB) = \frac{T}{J} \frac{\partial}{\partial T} E'(AB);$$

(1) P. DUHEM, *Sur l'effet Peltier* (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 6^e série, t. XII, p. 463; 1887).

d'où

$$(9) \quad \varpi' - \varpi = \frac{T}{J} \frac{\partial}{\partial T} [E'(AB) - E(AB)]$$

ou

$$(9 \text{ bis}) \quad \varpi' - \varpi = \frac{T}{J} \frac{dy}{dT},$$

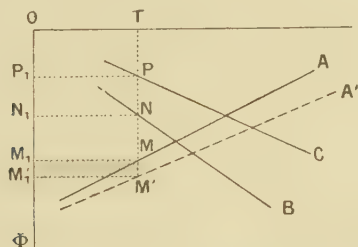
en désignant par y la variation de force électromotrice d'une pile thermo-électrique formée par les deux métaux A et B, produite par l'action d'un champ H; y sera déterminé par les expériences du Chapitre suivant.

Si A est un métal magnétique et si B ne l'est pas, les formules (9) et (9 bis) donnent la variation d'effet Peltier, non seulement à la soudure AB, mais à la soudure de A avec un métal non magnétique quelconque C, car il est facile de voir qu'on a

$$E'(AB) - E(AB) = E'(AC) - E(AC).$$

Ce résultat, comme les précédents, se retrouve très facilement par la considération des diagrammes thermo-électriques. Soit (*fig. 1*) un semblable diagramme, où les

Fig. 1.



températures sont comptées à partir du zéro absolu. Soient B et C les pouvoirs thermo-électriques de deux métaux non magnétiques, A et A' ceux d'un même corps magnétique dans le champ zéro et dans le champ H. On a immé-

diatement sur la figure

$$\varpi_T(AB) = \frac{T}{J} \frac{dE}{dT} = \frac{1}{J} \times \text{aire } M N M_1 N_1,$$

$$\varpi'_T(AB) = \frac{T}{J} \frac{dE'}{dT} = \frac{1}{J} \times \text{aire } M' N M'_1 N_1,$$

d'où

$$\varpi' - \varpi = \frac{1}{J} \times \text{aire } M M_1 M' M'_1.$$

Mais cette même quantité représente aussi la différence

$$\varpi'_T(AC) - \varpi_T(AC) = \frac{1}{J} [\text{aire } M' P M'_1 P_1 - \text{aire } M P M_1 P_1].$$

§ V. *Effets Thomson.* — Nous aurons à distinguer, dans les expériences qui vont suivre, deux sortes d'effets Thomson : l'un qui est produit par des différences de température entre les différentes tranches d'un même métal magnétique, le champ étant uniforme; l'autre qui est créé par des différences d'aimantation entre les différents points d'un corps magnétique dont la température est uniforme.

1. Le premier de ces effets est défini par la chaleur spécifique d'électricité σ . σ est, pour un métal magnétique, une fonction du champ H qu'il est facile de déterminer.

Considérons, en effet, un couple thermo-électrique formé d'un métal magnétique uni à un métal non magnétique, placé dans un champ uniforme. Soient σ la chaleur spécifique d'électricité pour le premier, σ_1 pour le second. On a

$$\frac{dE}{dT} = \frac{dH}{dT} + \sigma + \sigma_1,$$

E et H ayant les mêmes significations que dans l'équation (6).

Or,

$$\frac{dH}{dT} = J \frac{d\varpi}{dT} = \frac{dE}{dT} + T \frac{d^2 E}{dT^2}.$$

En remplaçant $\frac{dH}{dT}$ par cette valeur, on trouve

$$(10) \quad \sigma + \sigma_1 = -T \frac{d^2 E}{dT^2}.$$

Si le métal non magnétique du couple est le plomb, $\sigma_1 = 0$ et l'équation se réduit à

$$\sigma = -T \frac{d^2 E}{dT^2},$$

ou bien

$$(10 \text{ bis}) \quad \sigma = -T \frac{d\Phi}{dT},$$

Φ étant le pouvoir thermo-électrique du métal considéré, par rapport au plomb, à T^0 .

On voit donc que, quand l'expérience nous aura donné pour toute température la valeur de E en fonction de H , elle aura défini en même temps la façon dont σ dépend du champ magnétique.

2. Le second effet Thomson peut être pareillement défini à l'aide d'un coefficient λ (le même que nous avons déjà employé en généralisant la formule de Thomson), tel que dh étant la force électromotrice entre deux points à même température, où les champs diffèrent de dH , on ait

$$dh = \lambda dH.$$

La chaleur dégagée, en vertu de cet effet, entre les deux points par un courant d'intensité I et dans une seconde, aura donc pour valeur

$$dq = \frac{I}{J} \lambda dH.$$

On peut déduire la valeur de ce coefficient λ des mesures de force électromotrice, à condition de considérer les dégagements de chaleur entre deux tranches inégalement aimantées, et abstraction faite de l'effet Joule, comme étant des phénomènes réversibles analogues à l'effet Pel-

tier. Cette manière de voir, que certains physiciens, entre autres M. Budde (¹), M. Pellat (²), admettent pour l'effet Thomson proprement dit, c'est-à-dire pour le coefficient que nous avons appelé σ , doit paraître plus vraisemblable encore pour les effets que définit le coefficient λ . On peut même, dans l'hypothèse où les dégagements de chaleur qui nous occupent maintenant sont réversibles, retrouver simplement la formule de Thomson. On n'a qu'à considérer un circuit formé d'un métal magnétique F, dont une partie est placée dans un champ magnétique H_1 , et l'autre dans un champ H_2 , ce qu'on peut réaliser à l'aide d'écrans magnétiques, et l'on a un système qui se comporte comme s'il était formé par deux métaux différents, où les soudures sont remplacées par les passages d'un champ magnétique à un autre; les quantités de chaleur dégagées aux points de passage par le courant i seront données par $\varpi = \frac{T}{J} \frac{\partial E}{\partial T}$, E étant la force électromotrice d'une semblable pile, ou bien par $E = \frac{T}{J} \frac{\partial}{\partial T} V_T$, V_T étant la différence de potentiel qui existe, à l'état statique, entre le métal F placé dans le champ H_1 et dans le champ H_2 .

Désignons dès lors par f le métal non aimanté, par F le métal placé dans le champ H, et par F', le métal placé dans le champ $H + dH$. Nous avons trouvé

$$(2) \quad V_T(Ff) = \varphi(H) + [E'_T(fC) - E'_T(FC)]$$

ou bien

$$(2 \text{ bis}) \quad V_T(Ff) = \varphi(H) + \psi(H, T),$$

ψ étant une fonction qu'on peut déterminer par l'expé-

(¹) BUDDE, *Poggendorff's Annalen*, t. CLIII, p. 343; 1874.

(²) « L'effet Thomson n'est autre que l'effet Peltier entre deux parties d'un même métal rendues dissemblables par une inégalité de température. » (PELLAT, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 5^e série, t. XXIV, p. 83.)

rience. De même,

$$V_T(F_1 f) = \varphi(H + dH) + \psi(H + dH, T);$$

d'où

$$V_T(F_1 F) = V_T(F_1 f) - V_T(F f) = \frac{\partial \varphi}{\partial H} dH + \frac{\partial \psi}{\partial H} dH.$$

Le dégagement de chaleur au contact de F et de F_1 sera donc

$$\varpi_T(F_1 F) = - \frac{T}{J} \frac{\partial}{\partial T} V_T(F_1 F),$$

$$\varpi_T(F_1 F) = - \frac{T}{J} \frac{\partial^2 \psi}{\partial H \partial T} dH.$$

Or ce dégagement de chaleur n'est autre que $\frac{\lambda}{J} dH$. On a donc

$$(11) \quad \lambda = - T \frac{\partial^2 \psi}{\partial H \partial T}.$$

Si cette expression donne pour λ une valeur positive, il y a absorption de chaleur lorsque le courant passe du point placé dans un champ H au point où le champ est $H + dH$. La conclusion est renversée si λ est négatif.

Les dégagements de chaleur que nous venons d'étudier étant par hypothèse des phénomènes réversibles, on doit avoir, comme réciproque des conclusions précédentes, les deux propositions suivantes :

Si λ est positif en un point d'un métal magnétique placé dans un circuit, en chauffant ce point, on produit un courant dirigé, à travers la partie chaude, des régions neutres aux régions aimantées.

Si λ est négatif, il se produit un courant dirigé en sens contraire du précédent.

CHAPITRE II.

VARIATIONS DE FORCE ÉLECTROMOTRICE DES ÉLÉMENTS
CUIVRE-FER DOUX ET CUIVRE-ACIER DOUX PLACÉS DANS
UN CHAMP MAGNÉTIQUE. POUVOIRS THERMO-ÉLECTRIQUES
DU FER ET DE L'ACIER.

§ I. Les expériences que j'ai à décrire ici étant analogues à celles de MM. Strouhall et Barus, et Chassagny, j'ai employé à peu près le même dispositif que ces physiciens. Toutefois, mon but étant d'obtenir des champs plus intenses que ceux auxquels ils s'étaient arrêtés, j'ai dû remplacer la bobine magnétisante par un fort électro-aimant, et réduire le plus possible les dimensions de la pile thermo-électrique qui devait être placée entre ses pièces polaires.

Les expériences sur le fer et sur l'acier furent faites avec deux dispositifs un peu différents. Je décrirai avec quelques détails celui qui fut employé pour l'étude du fer, et me contenterai d'indiquer, pour l'autre, en quoi il différait du premier.

A. ÉTUDE DU FER DOUX.

§ II. *Principe de la méthode.* — Un circuit métallique fermé comprend deux piles thermo-électriques fer-cuivre en opposition A et A', un galvanomètre très sensible G et une force électromotrice e prise en dérivation sur un élément Gouy P (*fig. 2*). A peut être placé dans un champ magnétique H fourni par un électro-aimant EE. Si l'on fait $H = 0$, les deux piles A et A' ont des forces électromotrices ε et ε' qui s'équilibrent presque exactement; on maintient G au zéro à l'aide de la force électromotrice variable e :

$$\varepsilon = \varepsilon' = e.$$

Si l'on vient à placer A dans le champ H, A' restant en dehors de ce champ, ε prend une nouvelle valeur ε_1 , et il

faut, pour maintenir l'équilibre, donner à e une valeur e_1

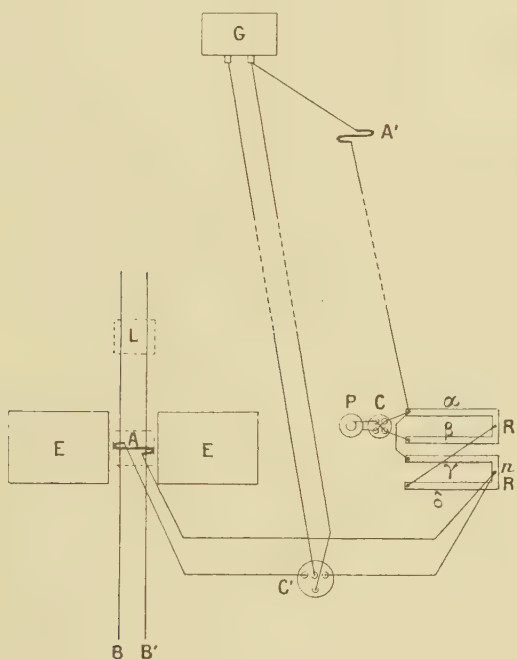
$$\varepsilon_1 - \varepsilon' = e_1;$$

d'où

$$\varepsilon - \varepsilon_1 = e - e_1.$$

On peut donc mesurer la variation de force électromotrice $\varepsilon - \varepsilon_1$.

Fig. 2.



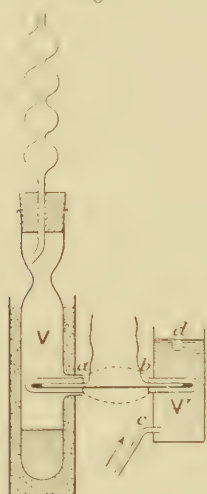
§ III. Examinons maintenant plus en détail les différentes parties de l'appareil.

a. Les deux piles thermo-électriques A et A' étaient identiques; chacune d'elles était constituée par un fil de fer doux de 10^{cm} de long et 0^{mm},5 de diamètre, aux deux extrémités duquel étaient soudés deux fils de cuivre de même diamètre. Les soudures avaient été faites en chauffant les deux fils rapprochés l'un de l'autre dans la flamme

du chalumeau oxyhydrique jusqu'au moment où l'extrémité du fil de cuivre, en fondant, formait bouton autour du fil de fer. Les fils étaient isolés par de petits tubes de verre qui les recouvraient jusqu'aux soudures.

Le mode de chauffage était également identique pour les deux piles. La soudure chaude était placée dans la vapeur d'eau bouillante; à cet effet, elle pénétrait par une ouverture latérale *a* (*fig. 3*) dans un tube de verre *V* ayant

Fig. 3.



3^{cm} de diamètre et 20^{cm} de long, terminé à sa partie supérieure par un tube à boules servant à la condensation de la vapeur. Toutefois, la soudure n'était pas immergée directement dans la vapeur; elle était entourée d'un tube en verre, fermé à son entrée par un tampon d'ouate. Le tube *V* était lui-même entouré d'un vase en terre poreuse, percé suivant une génératrice d'une rainure permettant de laisser passer la tubulure *a*. Avec une petite glissière en clinquant, on fermait la partie supérieure de la rainure, une fois le tube introduit; enfin, l'intervalle libre autour de *V* était rempli de sable sec, et l'on chauffait par-dessous

à l'aide d'un brûleur Bunsen. Ces dispositions permettaient d'obtenir une température bien constante à l'intérieur de V. La seconde soudure était enfermée, comme la première, dans un dé en verre qui pénétrait à l'intérieur d'un vase en terre poreuse V' par un trou percé en *b*. Un courant d'eau froide entraînait dans V' par *c* et s'écoulait par un trop-plein *d*.

Pratiquement, il est assez difficile d'obtenir par ce moyen une température bien constante de la soudure froide; j'y suis arrivé cependant en augmentant considérablement la vitesse du courant d'eau, et en choisissant convenablement le moment de l'expérience; j'avais opéré d'abord en mettant de la glace dans V'; mais, ce récipient étant très petit, la glace fondait très vite, et il se formait des cavités dans sa masse; c'est pourquoi je fus obligé de renoncer à cette manière d'opérer.

J'ajouterai qu'on avait pris la précaution d'envelopper d'ouate les parties de la pile placées entre V et V', et qu'un double écran en clinquant protégeait les parties froides contre le rayonnement des parties chaudes.

Tout l'appareil A, y compris le bec Bunsen, était installé sur un support qui permettait de le déplacer tout d'une pièce. Ce support était placé sur un chariot pouvant glisser sur deux rails en bois B, B' de 1^m,50 de long et perpendiculaires à l'axe de l'électro-aimant. On pouvait ainsi introduire l'appareil tout d'une pièce entre les pôles de celui-ci pour faire une détermination. Sur les mêmes rails pouvait glisser un autre chariot L portant l'appareil destiné à mesurer le champ magnétique, de telle sorte qu'on pût très rapidement les substituer l'un à l'autre et faire la mesure de H aussitôt après la détermination de $\varepsilon - \varepsilon_1$.

b. L'appareil employé à cet effet était celui que M. Leduc a décrit ⁽¹⁾ et qui, dans son principe, n'est autre que

(¹) *Journ. de Phys.*, 2^e série, t. VI; 1887.

le galvanomètre à mercure de M. Lippmann (¹). Cet appareil, que j'ai construit moi-même, m'a donné toujours d'excellents résultats, et je ne crois pas qu'il y ait de méthode plus commode et plus sûre pour la mesure des champs.

Dans sa construction, j'ai suivi à peu près les indications données par M. Leduc. Une mesure importante est celle de l'épaisseur ε de la caisse. Pour en obtenir la valeur avec précision, j'avais commencé par jauger au sphéromètre Perreaux l'épaisseur des lames de verre dont je faisais usage; ces lames étaient limitées par des plans non parallèles. Après avoir découpé les rectangles de verre, je mesurais leur épaisseur aux quatre coins; la caisse une fois faite, je mesurais son épaisseur extérieure prise aux quatre sommets. C'est de ces nombres que j'ai déduit l'épaisseur moyenne $\varepsilon = 0^{\text{mm}}, 486$. Je l'ai vérifiée par une méthode que M. Leduc n'indique pas dans son Mémoire, mais qui m'a paru susceptible de donner de bons résultats; elle consiste à placer la caisse, une fois faite, sur le porte-objet d'un microscope muni d'une vis micrométrique permettant d'évaluer les déplacements qu'on donne verticalement au corps du microscope, et à viser successivement les deux faces internes de la caisse; j'ai trouvé ainsi des nombres compris entre $0^{\text{mm}}, 480$ et $0^{\text{mm}}, 490$.

L'appareil monté et mis en place sur un cadre de bois, on détermine, par comparaison avec un manomètre à eau, la constante δ du manomètre eau-mercure, qui se trouve être égale ici à 1,526. Le champ était donc donné par la formule

$$H = 981 \frac{1,526 \times 0,0186 \times h}{\frac{1}{10}} = 727 \frac{h}{1},$$

h étant la dénivellation de la colonne d'eau, évaluée en

(¹) *Journ. de Phys.*, 2^e série, t. III, p. 384; 1884.

centimètres, et I le courant, évalué en ampères, qui traverse l'appareil.

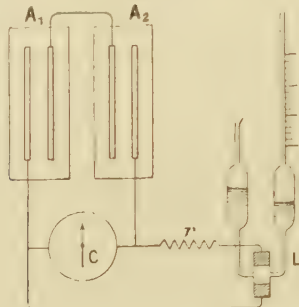
Pour les champs puissants, h , valant plusieurs centimètres, pouvait être évalué à l'œil nu, ou en s'aidant d'une loupe, au $\frac{1}{5}$ de millimètre près. On faisait alors passer dans l'appareil un courant de 3 ampères environ, c'est-à-dire qu'une dénivellation de 1^{mm} correspond à une variation de champ de 25 C.G.S. environ.

Pour les champs plus faibles, la lecture directe n'aurait pas donné de résultats précis. J'adaptais alors en face de la surface de l'eau, dans le manomètre, un microscope muni d'un micromètre oculaire. Chaque division du micromètre correspondait à un déplacement réel de la colonne d'eau de 0^{mm},0195, de telle sorte qu'on pouvait évaluer aisément le $\frac{1}{100}$ de millimètre. L'appareil pouvait alors se prêter aussi bien à la mesure des faibles champs qu'à celle des champs les plus intenses.

La seule difficulté consiste à avoir une mesure suffisamment précise de I . J'avais employé d'abord un voltamètre à sulfate de cuivre intercalé dans le courant, mais cette méthode exige plusieurs manipulations et demande un temps assez long pendant lequel le champ varie nécessairement. A cette méthode j'en ai substitué une autre, très rapide, et d'une exactitude suffisante. En principe, elle consiste à mesurer la différence de potentiel aux deux extrémités d'une résistance donnée. Le courant était fourni par deux accumulateurs A_1, A_2 (*fig. 4*) dont la force électromotrice était donnée par un voltmètre Carpentier gradué en dixièmes de volt et permettant d'apprécier le vingtième. La résistance totale du circuit comprenant l'appareil Leduc avait été mesurée, et l'on avait l'intensité par $I = \frac{e}{r}$; toutefois, pour plus de sûreté, j'avais d'abord étalonné à nouveau l'appareil en mesurant directement les intensités avec un électromètre Lippmann, et une résis-

tance connue, et vérifié que cette méthode ne comportait pas d'erreurs atteignant $\frac{1}{50}$; d'ailleurs, les erreurs des me-

Fig. 4.



sures, par rapport à l'une d'entre elles, seraient beaucoup moindres.

c. A l'aide de cet appareil, on procéda à une étude préliminaire du champ fourni par l'électro-aimant EE. La largeur de la pile A et de ses accessoires étant de $14^{\text{cm}}, 5$, les deux pôles de EE devaient être distants de 15^{cm} . Or, dans ces conditions, le champ n'est pas constant le long de l'axe si l'on prend les armatures ordinaires de l'électro; on trouve par exemple, à des distances D de l'une des armatures, celles-ci étant distantes de 14^{cm} et le courant envoyé dans l'électro, de 3,5 ampères :

D.....	$0^{\text{cm}}, 1$	$1^{\text{cm}}, 3$	$2^{\text{cm}}, 8$	$4^{\text{cm}}, 2$	$6^{\text{cm}}, 8$
H.....	78	62	43	32,5	20,5

J'ai donc été obligé de munir l'électro de deux grosses joues en fer doux ayant une forme carrée, de 13^{cm} de côté et 18^{mm} d'épaisseur. Ces joues, vissées à la place des armatures ordinaires, rendaient le champ constant à $\frac{1}{15}$ près, dans la partie où se trouvait le fil A; voici, par exemple, des mesures faites entre les armatures distantes de $14^{\text{cm}}, 5$:

D.....	$0^{\text{cm}}, 5$	1^{cm}	$3^{\text{cm}}, 2$	$4^{\text{cm}}, 2$	$6^{\text{cm}}, 5$
H.....	65	61,5	60	58,5	58,1

d. La pile P, sur laquelle était prise la force électromotrice complémentaire e , était un élément Gouy de faible résistance intérieure. La dérivation était prise sur P à l'aide d'un dispositif analogue à celui qu'ont employé MM. Chassagny et Abraham dans leur étude sur les piles thermo-électriques, et que la *fig.* 2 fait suffisamment comprendre. R et R' sont deux boîtes de 11 000 ω chacune, C un commutateur à quatre godets pleins de mercure. La résistance mise en α est généralement de 25 ω ; en β il y a 10000 ω , en δ 5000 ω et en γ une résistance variable. La différence de potentiel créée par P le long de mn , lorsque aucun courant ne passe dans le galvanomètre, est

$$e = 1,39 \text{ volt} \times \frac{25}{10000} \times \frac{\gamma}{5000} = 0,695\gamma \text{ en microvolts.}$$

e. On sait que, dans les circuits où l'on mesure des forces électromotrices très petites, il faut prendre un soin tout spécial pour que les contacts ne donnent naissance à aucune force électromotrice thermo-électrique parasite. Aussi tous les raccords étaient-ils de cuivre à cuivre, sauf en C' où se trouvait un commutateur à trois directions, fait de quatre tubes de verre, contenant du mercure, soutenus par de la paraffine dans un vase cylindrique également plein de mercure, pour égaliser les températures; un conducteur en cuivre, soutenu par un manche isolant, permettait de faire communiquer le tube central avec chacun des trois autres, et d'établir ainsi à volonté trois circuits différents. Le circuit (1) fermait le galvanomètre sur lui-même et permettait de vérifier son zéro. Le circuit (2) contenait G, A' et la force électromotrice prise sur P; il permettait d'établir A' et par suite A quand on avait mesuré $\varepsilon - \varepsilon'$. Le circuit (3) comprenait G, A, A' et la force électromotrice prise sur P; c'est celui dont on faisait usage pour la partie principale des expériences.

f. G était un galvanomètre de Sir W. Thomson à deux

paires de bobines de faible résistance, avec échelle placée à 2^m; cette échelle étant éloignée de 4^m de la place où se tenait l'observateur, on lisait les déviations à l'aide d'un viseur, ce qui, avec un peu d'habitude, peut se faire presque aussi exactement qu'à l'œil nu. On avait disposé G pour la plus grande sensibilité; un millionième d'ampère produisait sur l'échelle une déviation de 5^{cm} environ. Le galvanomètre était fixé sur une console à une extrémité de la salle d'expérience, et l'électro-aimant avait été placé à l'autre extrémité, à une distance de 6^m environ. Malgré cela, quand on actionnait l'électro, ce qui se faisait à l'aide de quinze accumulateurs, G était fortement influencé. J'ai réduit le plus que j'ai pu cette action en prenant sur le courant de l'électro une dérivation qui passait dans une spirale convenablement placée au voisinage de G. Mais le champ produit par la spirale est proportionnel rigoureusement à l'intensité du courant, tandis que le champ de l'électro n'est que sensiblement proportionnel à cette même intensité; la compensation ne peut donc se faire que d'une façon approximative.

§ IV. *Marche d'une expérience.* — On mettait en circulation le courant d'eau froide destiné à refroidir les soudures et l'on provoquait l'ébullition de l'eau autour des autres soudures. Au bout d'une heure environ, le système avait atteint un régime permanent. On procédait alors à la mesure de la force électromotrice de A' en fermant le circuit (2), à celle de $\varepsilon - \varepsilon'$ en fermant le circuit (3), ce qui donne la valeur de ε pour une différence de température que donnent les thermomètres plongés dans l'eau froide et l'eau bouillante. La température de l'eau froide ayant varié de 12° à 14°, j'ai ramené cette force électromotrice à ce qu'elle serait si les températures des deux soudures étaient toujours 13° et 100°.

La mesure de ε une fois faite, on procède à la mesure de $\varepsilon - \varepsilon_1$. Celle-ci peut se diviser en quatre temps :

1° A est à l'extrémité des rails, l'électro au repos. Le champ produit par son magnétisme rémanent (qui était plus petit que 10 C. G. S. entre les bobines) est absolument négligeable dans la position qu'occupe A. Le galvanomètre mis dans le circuit (1) s'arrête à la division n de l'échelle, qui est son zéro. On le place dans le circuit (3) et l'on détermine la résistance γ qu'il faut introduire en mn pour qu'il se fixe à la même division.

2° On ferme le circuit (1), puis on excite l'électro en y faisant passer un courant d'intensité I ; on fait glisser A sur les rails de façon à l'amener entre les armatures de l'électro; G s'arrête alors à une division n' qui est son nouveau zéro dans le champ produit par EE. On ferme le circuit (3) : G marque alors la division n'' .

3° On agit sur la résistance γ et on lui donne une valeur γ' telle que G revienne à la division n' . La variation de force électromotrice, produite sur A par le champ magnétique, est alors $0,695(\gamma' - \gamma)$ en microvolts; la pile A' n'a pas été influencée sensiblement par la production du champ, puisqu'elle est à 6^m environ de l'électro; la variation observée porte donc seulement sur A. Cela fait, on rétablit le circuit (1), et l'on voit si le galvanomètre reste bien à la division n' , ce qui est une garantie de la mesure faite.

4° On retire A à l'extrémité des rails, et on lui substitue, entre les pôles de l'électro, l'appareil Leduc; on procède à la mesure du champ.

La série de ces opérations dure moins de dix minutes, laps de temps pendant lequel on peut compter, en général, sur la constance des piles thermo-électriques et du champ magnétique. Quand celui-ci n'est pas très grand (inférieur à 150 C. G. S. environ), j'ai constaté qu'on peut simplifier notablement les manipulations, et opérer de la manière suivante :

Le fil A étant au bout des rails, le circuit (3) établi, et

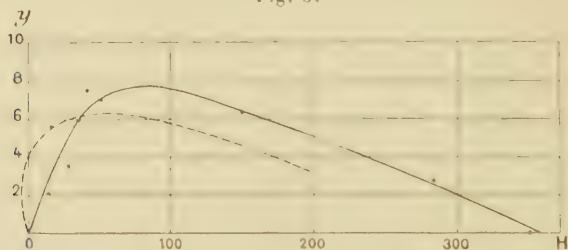
le galvanomètre au zéro, on excite l'électro, on note la nouvelle position d'arrêt n' du galvanomètre; puis on pousse A entre les pôles de l'électro, et l'on ramène le galvanomètre à la division n' en donnant à γ la valeur γ' ; l'effet à mesurer a pour valeur en microvolts $0,695(\gamma' - \gamma)$.

§ V. *Résultats.* — Avec le dispositif qui vient d'être décrit, j'ai fait trois séries d'observations qui m'ont toujours indiqué une augmentation de force électromotrice produite par aimantation. Voici les valeurs de cette augmentation γ évaluée en microvolts. H désigne la valeur correspondante du champ.

H. C. G. S.	γ (microv.).
13,8	2,1
16,4	5,6
28,5	3,5
35,5	5,95
41,5	7,7
49	7
150,4	6,3
287	2,8
352	0 (?)

Ces résultats sont représentés sur la *fig. 5* par des points; j'ai représenté aussi en traits pleins une courbe

Fig. 5.



qui s'écarte assez peu de ces points, et qui a pour équation

$$(12) \quad \gamma = 0,00159 \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428 H}.$$

Toutefois, cette courbe ne représente assez bien que les observations qui correspondent aux valeurs élevées du champ. Pour les autres, les points obtenus sont distribués assez irrégulièrement, et cette irrégularité ne peut pas être mise sur le compte d'erreurs d'expérience, car j'estime que celles-ci devaient être inférieures à 0,3 microv.

Il faut donc admettre que le problème qui consiste à évaluer la variation de ϵ dans un faible champ magnétique est mal déterminé. Le fer, même doux, conserve toujours en effet un magnétisme rémanent dont la grandeur dépend des champs successifs par lesquels il a passé. Soit h la valeur de ce champ au voisinage des soudures; la variation 0,695 ($\gamma' - \gamma$) observée correspond donc, non pas à une variation H , mais à une variation $H - h$ du champ. L'erreur commise, en remplaçant $H - h$ par H , ne devient faible que quand H est suffisamment grand.

Nous pouvons donc, sauf cette restriction pour les faibles valeurs de H , accepter l'équation (12) comme représentation des phénomènes. Nous verrons même dans le Chapitre suivant qu'elle recevra, de l'étude de l'effet Peltier, une confirmation qui nous permettra d'étendre sa portée jusqu'à des champs voisins de 1100.

J'ai tracé en traits discontinus, sur la *fig. 5*, la parabole qui représente les résultats obtenus par M. Chassigny. Elle est définie par l'équation

$$(H + 15y)^2 - 293H - 907y = 0.$$

On voit qu'elle présente la même allure que la courbe qui résulte de mes propres déterminations, et c'est la seule chose qui importe, car il n'y a pas deux échantillons de fer réputé doux qui soient identiques entre eux.

Je compléterai mes propres résultats en indiquant ici ceux de Strouhal et Barus, qui serviront à les compléter; ils se rapportent tous à une valeur du champ $H = 35$ C.G.S. Voici d'abord, toujours en microvolts, les résultats obtenus

à des températures inférieures à 100° . Si l'on désigne par t et T les températures des soudures, la force électromotrice de la pile employée est

$$E = 12,484(T - t) - 0,0224(T^2 - t^2).$$

E' représente la force électromotrice dans le champ $H = 35$.

	t	T	E' observé.	E calculé.	$E' - E$.
A	15,1	86,3	709,7	704,5	5,2
	15,0	72,5	609,3	605,8	3,5
	15,0	58,2	472,5	468,9	3,6
	15,0	46,2	350,0	347,0	3,0
	14,9	35,9	241,6	238,4	3,2

Ces résultats indiquent toujours une augmentation de force électromotrice par aimantation, qui croît avec T , mais ils sont trop peu précis, en raison de la petitesse de $E' - E$, pour se prêter à des calculs.

Il n'en est pas de même des résultats obtenus avec une autre pile thermo-électrique, la différence de température entre les soudures étant beaucoup plus considérable. Pour celle-ci, on a

$$(13) \quad E = 13,05(T - t) - 0,0262(T^2 - t^2) \quad \text{dans le champ zéro.}$$

Dans le champ $H = 35$, on trouve pour $E' - E$,

t .	T .	$E' - E$ observé.
16,5	99,2	4,4
15,4	134,0	11,1
17	328	27,2

D'après ces résultats, les auteurs représentent la force électromotrice E' , dans le champ $H = 35$, par

$$E' = 13,087(T - t) - 0,02605(T^2 - t^2).$$

Ces expériences et les miennes propres permettent, en

les complétant l'une par l'autre, de trouver la variation de force électromotrice $\gamma = E' - E$ en fonction de H , T et t . En effet, j'ai trouvé

$$(12) \quad \gamma = E' - E = \alpha \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428 H}.$$

α étant une fonction de $T - t$ qui pour $T - t = 87$ a pour valeur 0,00159. En prenant pour cette fonction la valeur donnée par Strouhal et Barus, on arrive en définitive à la relation

$$(14) \quad \gamma = E' - E = 10^{-7} [125(T - t) + 0,508(T^2 - t^2)] \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428 H}.$$

Cette expression peut être valablement employée pour des températures comprises entre 0° et 350° et des valeurs du champ comprises entre 0 et 350 C. G. S. Nous verrons même qu'elle donne des résultats satisfaisants par extrapolation jusqu'à $H = 1100$.

D'après les équations (13) et (14) les pouvoirs thermo-électriques, par rapport au cuivre du fer doux et du fer aimanté, ont pour valeur

$$\Phi(FC) = - \frac{dE}{dT} = -13,05 + 0,0524 T,$$

$$\Phi'(FC) = \Phi(FC) - 10^{-7} [125 + 1,016 T] \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428 H};$$

et par rapport au plomb

$$(15) \quad \Phi(FP) = \Phi(FC) + \Phi(CP) = -14,39 + 0,0430 T,$$

$$(16) \quad \begin{cases} \Phi'(FP) = \Phi'(FC) + \Phi(CP) \\ = \Phi(FP) - 10^{-7} [125 + 1,016 T] \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428 H}. \end{cases}$$

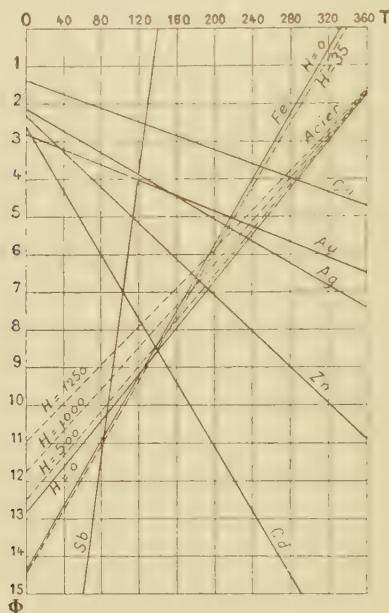
On a représenté (*fig.* 6) la valeur de $\Phi'(FP)$ et celle de $\Phi'(PP)$ pour $H = 35$.

Enfin, pour trouver la différence de potentiel entre le fer doux et le fer aimanté dans un champ H , on n'a qu'à ap-

plier la formule (2) établie au Chapitre I, ce qui donne :

$$(17) \quad V_T(Ff) = \varphi(H) - 10^{-7}[125T + 0,508T^2] \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428H}.$$

Fig. 6.



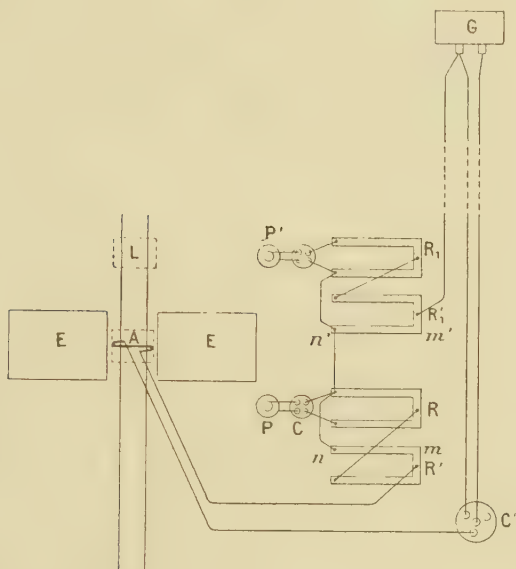
B. — *Étude de l'acier doux* (c'est-à-dire non trempé) ⁽¹⁾.

§ VI. *Dispositif et méthode*. — J'indiquerai les principales modifications apportées à l'appareil employé pour

(¹) Les expériences dont la description va suivre, et qui forment une série bien plus complète que les précédentes, furent entreprises précisément dans le but de les compléter; mais il se trouva que le fil avec lequel j'avais constitué ma nouvelle pile et que je croyais, l'ayant acheté comme tel, être en fer doux, était en réalité du fil d'acier. Ce n'est que plus tard, toutes les expériences calculées, que je m'en aperçus par la valeur de son pouvoir thermo-électrique, et je le vérifiai immédiatement, car ce fil, par la trempe, devient cassant comme du verre. Je compris alors, ce que je ne soupçonnais pas auparavant, combien il importe de différencier nettement le type acier du type fer au point de vue thermo-électrique.

l'étude du fer doux. La *fig. 7* se rapporte à ce nouveau dispositif.

Fig. 7.



1° La pile thermo-électrique A' était supprimée et remplacée par une dérivation prise sur un élément Gouy, à l'aide de deux boîtes de résistance R_1 , R'_1 . R_1 porte 4040^ω ; une dérivation prise sur 40^ω traverse, dans R'_1 , d'abord 200^ω , puis une résistance x évaluée en ohms et dixièmes d'ohm. La force électromotrice en mn vaut alors

$$1,39 \text{ volt} \times \frac{40}{4040} \times \frac{x}{200} = 68,8x \text{ en microvolts.}$$

On équilibre donc approximativement la force électromotrice de A à l'aide de x , et l'on achève d'établir l'équilibre à l'aide de la dérivation prise, comme précédemment, sur R et R'.

L'avantage de cette modification est de simplifier les manipulations et de donner une plus grande stabilité, puis-

qu'on n'a plus qu'une pile thermo-électrique à régler, au lieu de deux.

2° On avait diminué les dimensions de la pile A, afin de pouvoir obtenir un champ plus considérable. La nouvelle pile acier-cuivre n'a plus que 4^{cm},5 de long; elle est faite comme la pile fer-cuivre déjà décrite, sauf en ce que les fils de cuivre et d'acier (ce dernier préalablement recuit) venaient s'engager à chaque extrémité dans un petit culot en cuivre rouge ayant la forme d'un cylindre de 3^{mm} de long et 2^{mm} de diamètre, de sorte que les contacts acier-cuivre fussent nettement établis.

Le dispositif employé pour chauffer une des soudures et refroidir l'autre était resté le même, mais ses dimensions avaient été diminuées; le tube en verre, au lieu d'être placé dans un vase poreux, était entouré de drap, ou bien de peau de chamois et de papier d'amiante à sa partie inférieure, qui était chauffée par l'intermédiaire d'un bain de sable.

3° La largeur totale de A ainsi disposé était de 6^{cm},3, ce qui permettait d'établir entre les pièces polaires une distance de 6^{cm},5; de plus, on avait pu enlever les joues en fer et les remplacer par les armatures ordinaires, formées de disques de 3^{cm},5 de diamètre. Ces armatures ont l'avantage de resserrer le champ le long de l'axe, ce qui permet, pour une distance donnée entre les pôles et une intensité donnée, d'obtenir un champ plus intense; en même temps, la valeur du champ le long de l'axe restait constante à $\frac{1}{13}$ près, dans la partie utilisée par la pile A. On trouve, par exemple, pour une distance de 6^{cm},5 entre les armatures et $I = 6$ ampères,

Distance à l'armature . . .	0 ^{cm} ,4	1 ^{cm}	2 ^{cm}	3 ^{cm}
H	544	524	512	498

Certains expérimentateurs, MM. Cornu et Potier entre autres, ont signalé une altération de l'uniformité du champ

au voisinage du trou percé dans l'axe de l'électro-aimant. Depuis, M. Leduc n'a pas constaté cette influence, et elle m'a paru tout à fait négligeable (plus petite que 5 C.G.S. tout contre l'électro) dans l'appareil dont je disposais. D'autre part, l'altération du champ produite par la présence du fil d'acier de A doit être insignifiante. Je crois donc pouvoir admettre que A était placé dans un champ parallèle à son axe, et uniforme, à $\frac{1}{15}$ près, en tous les points de cette pile.

4° Le commutateur C', le même qui a été décrit précédemment, permettait de fermer à volonté deux circuits, l'un comprenant le galvanomètre seul, l'autre contenant, avec G, la pile A et les deux forces électromotrices prises sur P et sur P'.

§ VII. *Résultats.* — Les expériences se font comme on l'a indiqué au § IV. Voici les résultats :

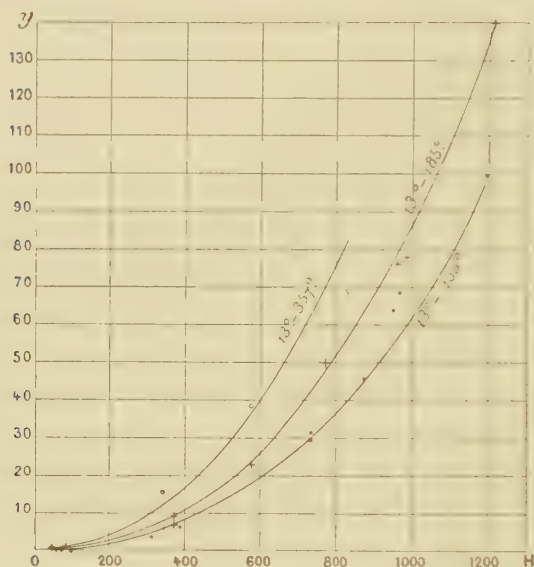
1° *Expériences entre 13° et 100°.* — Elles ont été faites en deux séries: dans la première, l'une des soudures était placée dans la vapeur d'eau; dans la seconde elle était plongée dans l'eau bouillante; ces deux procédés m'ont paru aussi bons l'un que l'autre. Le Tableau suivant donne la *diminution* γ de la force électromotrice observée, en microvolts, le champ H correspondant, et la valeur de γ calculée par la formule

$$(18) \quad \gamma = 0,0000448 \frac{H^2}{1 - 0,000289H}.$$

H C.G.S.	γ observé.	γ calculé.
51	0	0,1
69	0	0,2
116	0	0,6
311	3,8	4,7
339	5,6	5,6
386	6,3	7,3
733	29,9	30,1
733	31,3	30,1
872	45,9	45,4
949	64,2	55,5
964	68,8	61,7
1196	99,3	98,3

On a représenté sur la *fig. 8* la courbe définie par l'équation (18) et l'on a marqué par des points (.) les valeurs de y données par l'expérience.

Fig. 8.



2° *Expériences entre 13° et 185°* (vapeur d'aniline bouillante). — On fit deux séries d'observations dont les résultats sont contenus au Tableau suivant; ce Tableau donne également les valeurs de y calculées par la formule

$$(19) \quad y = 0,000062 \frac{H^2}{1 - 0,000289H}.$$

H.	y observé.	y calculé.
46	0	0,1
17	0,3	0,1
94	1 (?)	0,6
116	1,4	0,9
231	2,8-2,77	3,2
370	7	9,5
370	9,2	9,5
574	23	23
771	50	47
960	76	79,3
987	78	83,8
1211	110	138,11

La *fig.* 8 porte, outre la courbe (19), les valeurs de γ obtenues par l'expérience; elles sont représentées par des croix (+).

3° *Expériences entre 13° et 357°* (ébullition du mercure). — Les expériences faites dans ces conditions sont beaucoup plus difficiles, et je n'ai pu faire qu'un petit nombre de déterminations, dans une seule série, en réduisant le plus possible le temps de chaque expérience. On peut en représenter à peu près les résultats par la formule

$$(20) \quad \gamma = 0,0000918 \frac{H^2}{1 - 0,000289H}.$$

Voici les résultats des observations, et les valeurs de γ calculées au moyen de (20)

H.....	54	347	576	830
γ observé.....	0(?)	15,4	38,5	69,3
γ calculé.....	0,1	12,3	36,7	83

La *fig.* 8 contient la courbe représentée par l'équation (20) et les valeurs de γ observées, qui sont représentées par de petits ronds (o).

On voit, par l'examen des résultats qui précèdent, que l'aimantation de l'acier ne donne jamais une augmentation de force électromotrice, comme cela a lieu pour le fer; ce résultat, qui m'avait d'abord paru anormal, a été confirmé par beaucoup d'autres observations; dans toutes, la déviation du galvanomètre, quand on produisait le champ magnétique, était de même sens que celle qui se produisait quand on laissait refroidir la soudure chaude de la pile A.

J'avais cru d'abord pouvoir attribuer ce résultat à ce que l'acier de la pile A était déjà aimanté longitudinalement, mais il n'en est rien; en effet, j'ai démonté la pile, je l'ai chauffée jusqu'au rouge-cerise dans un bec Bunsen; enfin, l'ayant laissée refroidir lentement, je l'ai replacée

dans l'appareil et j'ai opéré en envoyant dans l'électro des courants faibles. Voici les résultats obtenus, les soudures étant à $13^{\circ}, 2$ et 100° :

H.....	17	38,5	85
γ	0	0,3(?)	0,9

γ représente en microvolts la diminution de force électromotrice. L'effet n'est donc jamais dans le même sens que pour le fer doux.

J'avais pensé aussi, d'après les expériences de Sir W. Thomson, que l'aimantation transversale (c'est-à-dire perpendiculaire à la longueur de la pile) devait produire des effets contraires à ceux de l'aimantation axiale, et pouvait par suite intervenir dans l'interprétation des résultats obtenus. J'ai pu me convaincre qu'il n'en est rien; l'effet de l'aimantation transversale est de même sens que celui de l'aimantation axiale, mais plus petit (résultat analogue à celui trouvé par M. Grimaldi pour le bismuth) : ayant remis à l'électro ses joues en fer, et fait subir à l'appareil quelques autres modifications de détail pour pouvoir placer la pile A perpendiculairement aux lignes de force, je fis une détermination (entre 13° et 100°) qui, pour un champ $H = 493$, donna une diminution de force électromotrice $\gamma = 8^{\text{mv}}, 4$; on aurait trouvé $12^{\text{mv}}, 5$ si A avait été placé suivant la diminution des lignes de force.

Il faut donc admettre comme un fait d'expérience que les propriétés thermo-électriques du fer et de l'acier sont modifiées dans des sens différents, quand on les place dans des champs inférieurs à 350 C. G. S.

§ VIII. Nous allons maintenant condenser dans une seule formule les résultats des expériences; ceux-ci sont représentés par les formules (18), (19), (20). Elles sont de la forme

$$\gamma_1 = \alpha_1 \varphi(H),$$

$$\gamma_2 = \alpha_2 \varphi(H),$$

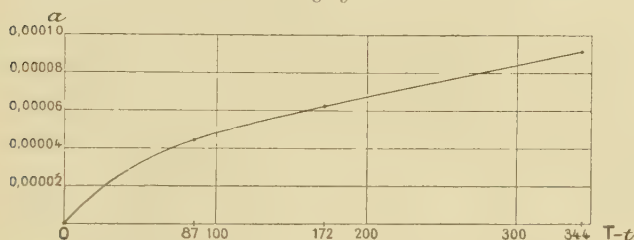
$$\gamma_3 = \alpha_3 \varphi(H).$$

Les quantités a_1 , a_2 , a_3 étant indépendantes de H ne peuvent dépendre que des températures T et t des deux soudures. Nous supposons qu'elles ne sont fonction que de $T - t$; pour déterminer la nature de cette fonction, construisons la courbe $a = F(T - t)$. On a, pour la déterminer, les points dont les coordonnées sont

$T - t = 0$,	$a = 0$,
$T - t = 100 - 13 = 87$,	$a = 0,0000448$,
$T - t = 185 - 13 = 172$,	$a = 0,0000620$,
$T - t = 357 - 13 = 344$,	$a = 0,0000918$.

Le résultat est représenté sur la *fig. 9*. On pourrait représenter la courbe comme une branche d'hyperbole ou

Fig. 9.



de parabole, mais j'ai préféré, pour me tenir plus près de l'expérience, employer une expression à trois termes, qui est ici

$$a = 10^{-7} [7,4714(T-t) - 0,031(T-t)^2 + 0,0000495(T-t)^3],$$

de telle sorte que la diminution de force électromotrice d'une pile formée d'acier doux et d'un métal non magnétique quelconque, placée axialement dans un champ H , est, en microvolts :

$$(21) \quad \left\{ \begin{array}{l} y = 10^{-7} [7,4714(T-t) - 0,031(T-t)^2 \\ \quad + 0,0000495(T-t)^3] \frac{H^2}{1 - 0,000289H} \end{array} \right.$$

Cette formule est valable pour $T - t$ compris entre 0°

et 350° et II compris entre 0° et 1200° . D'autre part, on détermine la force électromotrice de la pile employée aux températures $t = 13$, $T = 100, 185, 357$. Cette détermination a donné

T.....	100	185	357
E observé....	804 ^{mv}	1293	1403
E calculé....	803,6	1301	1409,2

E peut être représenté par la formule

$$(22) \quad E_{13}^T = 0^{mv}, 02(T - 13)[548 - (T - 13)],$$

(22) représente une parabole à axe vertical; le point neutre serait à 287° , nombre voisin de celui trouvé par Sir W. Thomson (284°).

La force électromotrice E' de la même pile, placée aux températures $t = 13$ et T dans un champ H, est alors

$$(23) \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{13}^T = E - \gamma = 0,02(T - 13)[548 - (T - 13)] - 10^{-7} \\ \quad \times [7,4714(T - 13) - 0,021(T - 13)^2 \\ \quad + 0,000040(T - 13)^3] \frac{H^2}{1 - 0,000289H} \end{array} \right.$$

C'est aussi sensiblement une parabole; du reste, on sait qu'il n'y a aucune raison théorique qui oblige les courbes thermo-électriques à être exactement paraboliques; ce mode de représentation est purement empirique; il n'a de signification que dans la théorie de Tait, théorie que l'expérience n'a pas complètement vérifiée, en ce qui concerne le fer et l'acier.

La position du point neutre dans la courbe (23) est définie à l'aide de l'équation $\frac{\partial E'}{\partial T} = 0$, ce qui donne, en représentant par $\varphi(H)$ la quantité $\frac{H^2}{1 - 0,000289H}$,

$$10^{-9} \times 1,5 \varphi(H) [T - 13]^2 + [4 - 10^{-7} \times 6,2 \times \varphi(H)] \\ \times (T - 13) - 1096 + 10^{-3} \times 7,17 \times \varphi(H) = 0,$$

équation du second degré qui donne, pour la température neutre T_n , les valeurs suivantes :

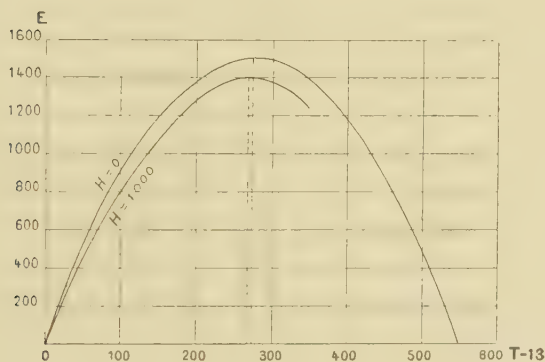
H.....	0	250	500	750	1000	1250
$\varphi(H)$...	0	67,200	290,700	712,000	1408,000	2441,000
T_n	287°	286,5	285,9	283,5	281	277

On voit donc que la température neutre s'abaisse lentement, à mesure que le champ devient plus puissant. La force électromotrice maximum baisse également; ainsi, elle a pour valeurs, en microvolts :

Dans le champ...	H = 0	$E_m = 0,02 \times 274^2 = 1501,5$
»	... H = 1000	$E'_m = 1500,8 - 102,5 = 1398,3$

On a représenté (*fig. 10*), à l'aide des coordonnées, la

Fig. 10.



force électromotrice, comptée à partir de 13°, de la pile acier-cuivre dans le champ zéro et dans le champ $H=1000$.

On peut tirer de la formule (22) le pouvoir thermo-électrique de l'acier neutre. On a, par rapport au cuivre,

$$\Phi(AC) = -\frac{dE}{dT} = -11,48 + 0,04T$$

et par rapport au plomb, en prenant pour $\Phi(CP)$ la valeur

donnée par Tait — 1,34 — 0,0094 T

$$\Phi(\text{AP}) = \Phi(\text{AC}) + \Phi(\text{CP}) = -12,82 + 0,0306 \text{ T} \quad (1),$$

La formule (23) définit pareillement le pouvoir thermo-électrique du même acier dans un champ H :

$$\begin{aligned} \Phi'(\text{AC}) &= -\frac{dE'}{dT} = -11,48 \\ &+ 0,04 \text{ T} + 10^{-7} [7,471 - 0,062 (\text{T} - 13) + 0,000148 (\text{T} - 13)^2] \varphi(\text{H}), \\ \Phi'(\text{AP}) &= -12,82 \\ &+ 0,0306 \text{ T} + 10^{-7} [7,471 - 0,062 (\text{T} - 13) + 0,000148 (\text{T} - 13)^2] \varphi(\text{H}). \end{aligned}$$

On a représenté, sur les diagrammes de la *fig.* 6, $\Phi(\text{AP})$ et $\Phi'(\text{AP})$ pour $\text{H} = 500$, $\text{H} = 1000$, $\text{H} = 1250$.

Il est facile de prévoir, avec ces diagrammes, ce qui arriverait si l'on unissait l'acier à un métal quelconque non magnétique; si ce métal est positif par rapport à l'acier, la différence $E - E'$ est toujours positive et augmente avec T, mais E et E' sont des grandeurs algébriques. Si l'on ne considère que leurs valeurs absolues, il y aura une valeur T_1 de T pour laquelle $E + E' = 0$; l'introduction dans le champ magnétique change alors le sens de la force électromotrice sans changer sa grandeur, et pour $T > T_1$ la force électromotrice, prise en valeur absolue, est augmentée par l'aimantation. Pour un couple acier-cadmium, dont une soudure serait à 0° , et qu'on ferait passer du champ $\text{H} = 0$ au champ $\text{H} = 1000$, T_1 serait égal à 269° , c'est-à-dire que le phénomène dont nous parlons serait assez facile à constater par expérience.

Dans le cas où l'acier est uni à un métal M négatif par rapport à lui, il y a toujours augmentation de la force électromotrice $E_0(\text{AM})$ par aimantation; mais, si l'on considère seulement la valeur absolue de E, à partir d'une cer-

(1) Tait donne pour l'acier

$$\Phi(\text{AP}) = -11,27 + 0,0325 \text{ T}$$

et pour le fer

$$\Phi(\text{FP}) = -17,15 + 0,0482 \text{ T}.$$

taine température T_1 , elle diminue par l'action du champ; ainsi pour le couple acier-antimoine, fonctionnant entre $H = 0$ et $H = 1000$, T_1 serait égal à 182° , t étant maintenu à zéro.

L'examen des diagrammes de la *fig.* 6 appelle encore la remarque suivante :

Selon toute vraisemblance, les diagrammes de l'acier aimanté coupent celui de l'acier doux à des températures voisines de 400° , et sans doute ils passent au-dessous pour des températures plus élevées, c'est-à-dire que, au-dessus de 400° ou 500° , l'aimantation doit agir sur l'acier comme elle agit sur le fer aux températures ordinaires. Au contraire, les diagrammes du fer doux et du fer aimanté doivent se couper au voisinage de -50° ; le fer doux, à des températures suffisamment basses, doit donc se comporter comme l'acier aux températures ordinaires. On ne peut s'empêcher de rapprocher ces résultats des suivants : à des températures suffisamment élevées, un barreau d'acier n'a plus de magnétisme rémanent, mais il peut encore acquérir une aimantation temporaire, tout comme le fer aux températures peu élevées; inversement, le fer doux, plongé dans un mélange d'acide carbonique solide et d'éther, possède un magnétisme rémanent considérable, comme l'acier à la température ambiante.

Je terminerai ce Chapitre en tirant des formules (2) et (21) l'expression de la différence de potentiel entre l'acier doux et l'acier aimanté dans un champ H , à T° ; on trouve pour cette différence

$$(24) \quad V_T(A\alpha) = \varphi(H) \\ + 10^{-7} [8,302 T - 0,0329 T^2 + 0,0000495 T^3] \frac{H^2}{1 - 0,000289 H}.$$

CHAPITRE III.

INFLUENCE DE L'AIMANTATION SUR L'EFFET PELTIER.

J'exposerai d'abord les recherches expérimentales directes que j'ai faites sur le contact fer-cuivre.

§ I. *Principe de la méthode.* — J'ai dû renoncer à me servir des méthodes calorimétriques employées jusqu'ici par les physiciens pour mesurer l'effet Peltier; il est difficile, en effet, pour ne pas dire impossible, de placer un calorimètre ordinaire dans un champ magnétique uniforme; le calorimètre à glace de Bunsen aurait seul pu être employé, mais l'échauffement produit par la spirale magnétisante aurait nécessité des corrections de beaucoup supérieures à l'effet à mesurer.

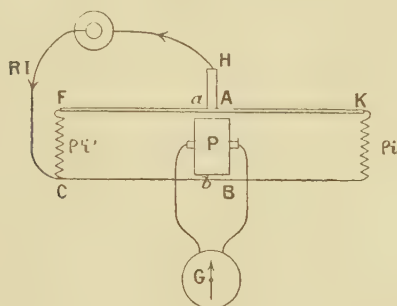
Le principe de la méthode à laquelle je me suis arrêté consiste à produire l'effet Peltier, qu'on étudie au contact d'une des faces d'une pile thermo-électrique très sensible, et à équilibrer son action par un échauffement produit sur l'autre face à l'aide d'un courant variable à volonté et traversant une résistance constante. C'est donc une méthode de zéro (¹).

Le courant fourni par une force électromotrice E (*fig. 11*) se bifurque en A et C. Il traverse une lame de fer FAK et une lame de cuivre AH soudée sur celle-ci. FK est placé dans un champ magnétique qu'on peut faire varier à volonté. L'échauffement produit en A agit sur une des faces d'une pile thermo-électrique P; la dérivation

(¹) Elle présente une certaine analogie avec le procédé que M. Le Roux a employé et décrit (*Ann. de Chim. et de Phys.*, 4^e série, t. X, p. 282; 1867) pour mesurer l'effet Thomson dans le bismuth. Elle pourrait également être employée pour comparer les valeurs de l'effet Peltier à différentes soldures, et surtout pour vérifier rapidement la proportionnalité de cet effet à l'intensité du courant.

passant dans une résistance b produit sur l'autre face un échauffement, et l'on règle les résistances de telle sorte que ces deux dégagements de chaleur s'équilibrent. Le galvanomètre G , relié à la pile P , reste alors au zéro.

Fig. II.



Soient R, I la résistance et l'intensité de la partie principale du circuit, ρ, i, ρ', i' les quantités analogues pour les deux dérivationes AKC et AFC , a et b les résistances en A et B , π l'effet Peltier, qui, le courant passant du fer au cuivre, correspond à un dégagement de chaleur.

Les quantités de chaleur dégagées par seconde en face des deux pôles de la pile thermo-électrique sont $\frac{\alpha I^2}{J} + \pi I$ d'un côté, et de l'autre $\frac{b i^2}{J}$, J étant l'équivalent mécanique de la chaleur. Si elles produisent sur ses deux faces d'égales variations de température, on peut écrire

$$\alpha I^2 + J \pi I = k b i^2,$$

k étant une quantité qui ne dépend que de la forme de l'appareil et de la nature des substances dans le voisinage de A et B ; c'est donc, dans le cas actuel, une constante.

Si, d'autre part, on s'arrange pour rendre la constante α entièrement négligeable, on aura, pour l'équation d'équi-

libre dans un champ magnétique nul,

$$\varpi = \frac{kb i^2}{J I}.$$

Mais, d'après les lois des courants dérivés, on sait que

$$i = I \frac{\rho'}{\rho + \rho'}, \quad I = E \frac{1}{R + \frac{\rho \rho'}{\rho + \rho'}}.$$

En remplaçant i et I en fonction de E , R , ρ , ρ' , il vient

$$\varpi = \frac{K b E}{J} \frac{\rho'^2}{(\rho + \rho') [R \rho + \rho' (R + \rho)]}.$$

Supposons maintenant que l'on produise un champ magnétique H ; il faudra, pour ramener G au zéro, remplacer ρ' par ρ'' , et la nouvelle équation d'équilibre sera, en désignant par ϖ' la nouvelle valeur de l'effet Peltier,

$$\varpi' = \frac{K b E}{J} \frac{\rho''^2}{(\rho + \rho'') [R \rho + \rho'' (R + \rho)]};$$

d'où l'on tire

$$(25) \quad \frac{\varpi'}{\varpi} = \frac{\rho''^2}{\rho'^2} \frac{(\rho + \rho') [R \rho + \rho' (R + \rho)]}{(\rho + \rho'') [R \rho + \rho'' (R + \rho)]}.$$

C'est la relation dont j'ai fait usage; le second membre ne renferme en effet que des résistances qu'on peut mesurer.

Sensibilité. — Dans l'équation $\varpi = \frac{K b i^2}{J I}$, ϖ , i et I sont des fonctions de H ; en différenciant, on obtient

$$d\varpi = \frac{K b i}{J I^2} (2 I di - i dI).$$

Pratiquement, le terme $i dI$ est faible vis-à-vis de $2 I di$; donc on a sensiblement

$$\frac{di}{d\varpi} = \frac{J}{2 K b} \frac{I}{i} = \frac{J}{2 K b} \frac{\rho + \rho'}{\rho'}.$$

Or, i étant à peu près proportionnel, pour de faibles

variations, à ρ' , $\frac{di}{d\omega}$ est à peu près proportionnel à la sensibilité $\frac{d\rho'}{d\omega}$; on voit donc qu'il y a intérêt, pour augmenter celle-ci, à rendre b assez petit et à augmenter ρ .

Pratiquement, voici comment j'ai opéré pour trouver les conditions les plus favorables.

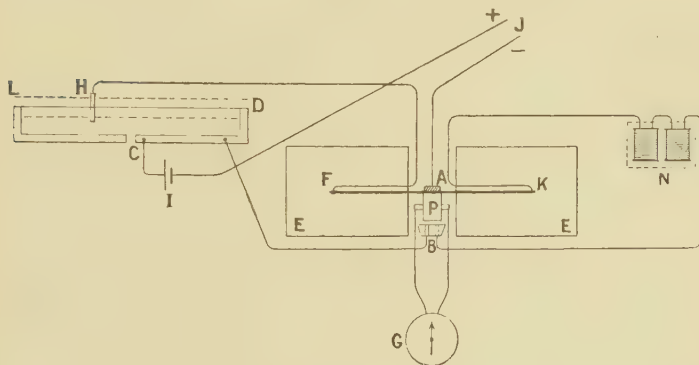
J'ai formé l'expression de la sensibilité

$$\frac{d\rho'}{d\omega} = \frac{J}{KbE} \frac{(\rho + \rho')^2 [R\rho + \rho'(R + \rho)]^2}{\rho\rho' [2R(\rho + \rho') + \rho\rho']},$$

et j'ai dressé une Table de ses valeurs pour les principales valeurs de ρ et ρ' . Nous verrons, en décrivant l'appareil, quelles étaient les conditions que j'ai trouvées les meilleures.

§ II. *Description de l'appareil.* — La fig. 12 fait comprendre la disposition adoptée.

Fig. 12.



La pièce de fer FK, portant la lame de cuivre soudée en A, est placée dans l'axe d'un électro-aimant EE. Le courant principal, lancé par quatre accumulateurs placés en J, traverse un interrupteur I et se bifurque en A et C. La première dérivation traverse une résistance variable prise sur un pont à fil. La seconde traverse en B la résistance b dont nous avons parlé, et en N deux bobines qui forment la

majeure partie de la résistance ρ . Enfin, la pile thermo-électrique P est reliée au galvanomètre G. Ce dernier, le même qui a été employé pour les expériences précédentes, est placé à 6^m de l'électro et muni d'une spire compensatrice destinée à réduire l'action de celui-ci.

Examinons maintenant avec quelques détails les parties principales de l'appareil :

1° FK étant une lame de tôle douce, ayant 19^{cm} de long, 1^{cm} de large et 0^{mm},5 d'épaisseur, en son milieu A on avait soudé une lame de cuivre, perpendiculaire à sa direction, ayant même largeur, 0^{mm},9 d'épaisseur et 3^{cm},2 de long. La surface de contact des deux métaux formait donc un carré de 1^{cm}, c'est-à-dire un peu plus étroit que la surface de la pile thermo-électrique, contre laquelle elle s'appliquait par sa face cuivre; la chaleur dégagée à la soudure était ainsi portée à la pile à travers une lame de cuivre peu épaisse et bonne conductrice de la chaleur.

Il est facile de se rendre compte que, dans ces conditions, le terme αI^2 est bien négligeable vis-à-vis des autres, comme nous l'avons supposé en écrivant l'équation fondamentale. Bien qu'il soit très difficile de calculer α , on peut en obtenir une limite supérieure en supposant que les deux métaux placés vis-à-vis de la pile P sont parcourus successivement par le courant, celui-ci les traversant perpendiculairement à leur section minima; on trouve ainsi, pour le maximum de α , 2×10^{-7} ohms. D'autre part, I était égal à 2 ampères environ, et $\varpi = 3 \times 10^{-3}$ volts. La chaleur dégagée par seconde, en vertu de l'effet Peltier, sera donc 6×10^{-3} joules, et celle qui correspond à l'effet joule, aura pour maximum $\alpha I^2 = 8 \times 10^{-7}$; elle est donc absolument négligeable par rapport à la première.

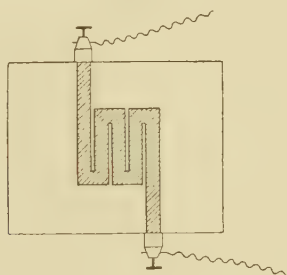
2° *Résistances*. — La difficulté est d'obtenir des résistances qui n'éprouvent pas de variations accidentelles du fait des variations de température; les variations à longue

période ne sont pas à craindre, l'expérience ne durant que quelques minutes. Les résistances principales doivent donc être soigneusement protégées et reliées entre elles par de gros fils à faible résistance; ceux-ci étaient faits d'un fil de cuivre ayant $0^{\text{mm}},9$ de diamètre, et dont le mètre courant avait une résistance de $0^{\omega},025$ à 10° .

La résistance ρ était formée, pour la partie principale, par deux petites bobines de fil de maillechort, valant, l'une $0^{\omega},397$, l'autre $0^{\omega},583$; elles étaient enveloppées de plusieurs couches d'ouate et enfermées dans une boîte en bois; la résistance ρ tout entière, mesurée directement une fois l'appareil monté, était de $1^{\omega},201$, y compris b qui valait $0^{\omega},143$.

Cette dernière résistance était faite, comme l'indique la *fig. 13*, d'une lame assez mince de platine plusieurs fois

Fig. 13.



retournée sur elle-même, et appliquée avec de la cire contre une lame en bois. Sa partie principale formait un carré de 1^{cm} de côté, c'est-à-dire un peu plus petit que la face de la pile thermo-électrique contre laquelle il était appliqué.

Le circuit principal comprenait une résistance égale à $3^{\omega},299$, formée par une bobine en fil de cuivre placée dans une boîte garnie d'ouate, et une canalisation allant aux accumulateurs et valant $1^{\omega},092$; par suite $R = 4^{\omega},391$; ici la partie non protégée de la résistance était fatalement

très considérable, les accumulateurs étant éloignés de la salle d'expérience, mais je n'ai pas trouvé que cette disposition présentât d'inconvénients; en réalité, les conducteurs sont presque partout placés entre la muraille et des lames de bois, et d'ailleurs recouverts d'une couche épaisse d'isolants; ainsi leur résistance ne présente pas de variations brusques.

Il faut beaucoup plus de précautions pour la résistance ρ' , dont les moindres variations rompent l'état d'équilibre. J'ai employé, pour la constituer, un pont à fil dont la partie principale est un fil de maillechort ayant 1^m de longueur et une résistance de 0^m,345. J'ai dû supprimer le mode de contact employé dans cet appareil, et qui consiste en une touche métallique qu'on peut appuyer contre le fil; je l'avais remplacée par une boîte en bois, ayant 2^{mm} d'épaisseur à l'intérieur, que traverse le fil, et contenant du mercure dans lequel plonge un second fil de maillechort par lequel arrive le courant. Le raccord maillechort-cuivre est entouré d'ouate; tout le fil ED et le contact H sont enfermés dans un manchon de toile rempli d'ouate, ce qui permet de déplacer le contact H sans que la résistance ρ' cesse d'être protégée; malgré ces précautions, je ne fus que médiocrement satisfait de ce rhéostat, et je regrette de ne pas en avoir connu alors de plus parfait; en effet, il était impossible en plein jour d'obtenir un équilibre stable de l'appareil; je fus forcé de maintenir fermés constamment les volets de la salle d'expériences, et de m'éclairer d'un bec de gaz contre les radiations duquel étaient protégés par des écrans la pile P et le rhéostat; et encore je n'obtins de bonnes déterminations qu'en opérant aux premières heures du matin.

3^e La pile thermo-électrique P était une pile Becquerel, au cuivre-sulfure de cuivre, de trente éléments, ayant 12^{mm} de côté; c'est de beaucoup la plus sensible de toutes celles dont j'ai pu disposer. La soudure fer-cuivre

A et la résistance en platine B étaient appliquées contre chacune de ses faces, avec interposition d'une feuille de papier de soie; cette séparation fut trouvée suffisante pour qu'aucune dérivation ne s'établît entre les deux branches du circuit à travers la pile thermo-électrique; l'adhérence des deux pièces A et B était établie à l'aide de ressorts en caoutchouc. De plus, il était nécessaire de protéger cette partie de l'appareil contre l'échauffement qui se produit quand on excite l'électro. A cet effet, la lame de fer FK et les fils de cuivre qui y aboutissaient étaient enfermés dans des tubes en caoutchouc, placés eux-mêmes dans des tubes de verre.

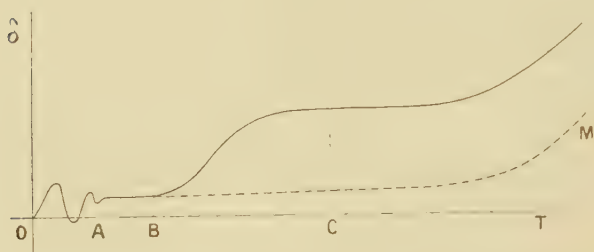
La partie centrale, contenant la pile P et les pièces A et B, avait été enveloppée dans des lames de caoutchouc, puis l'appareil avait été disposé entre les deux faces de l'électro, distantes de $3^{\text{cm}},8$, les pièces polaires retirées, les extrémités de la lame de fer pénétrant dans les trous qui traversent les noyaux de fer doux; enfin, tous les intervalles avaient été bourrés avec de l'ouate, et l'électro lui-même recouvert d'un manchon en carton épais.

§ III. *Marche d'une expérience.* — Après avoir monté l'appareil et mesuré les résistances des différentes pièces qui le constituaient, j'ai procédé aux expériences définitives.

A cet effet, on commence par envoyer le courant des accumulateurs J dans le circuit. Le champ magnétique produit par ce courant donne une légère déviation du miroir du galvanomètre, puis, presque aussitôt, l'échauffement produit en A et en B détermine une déviation qui se produit progressivement, et qu'on amène à être nulle en agissant sur le pont à fil; après quelques tâtonnements, G est ramené à zéro et s'y maintient. On excite alors l'électro-aimant; le galvanomètre prend une nouvelle position d'équilibre, qu'on note, puis s'en écarte lentement, et va se fixer à une nouvelle position. A ce moment, on

agit sur la résistance ρ' du pont à fil de manière à ramener G à son zéro antérieur; il faut lui donner une nouvelle valeur, qui est ρ'' . L'expérience ne doit pas durer plus d'un quart d'heure, à partir du moment où on excite l'électro, sans quoi l'échauffement produit par les spirales magnétisantes se communique inégalement aux deux faces de la pile P, et l'on a alors une nouvelle déviation, qui croît indéfiniment. La courbe de la *fig. 14* donne une idée de

Fig. 14.



la série des déviations observées δ à partir du moment où l'on excite l'électro-aimant. La partie BC de la courbe correspond à la variation d'effet Peltier qu'on veut caractériser.

Au delà de C, l'accroissement des ordonnées tient à l'échauffement produit par EE. Si l'on fait l'expérience à blanc, c'est-à-dire sans envoyer le courant des accumulateurs J, la courbe des déviations présente la forme indiquée en OM; ce qui justifie la façon dont nous avons interprété les phénomènes et effectué les mesures.

L'expérience faite, il faut abandonner l'appareil à lui-même jusqu'à ce qu'il reprenne l'équilibre de température avec la salle d'expériences; pratiquement on ne pouvait pas faire plus d'une expérience par jour.

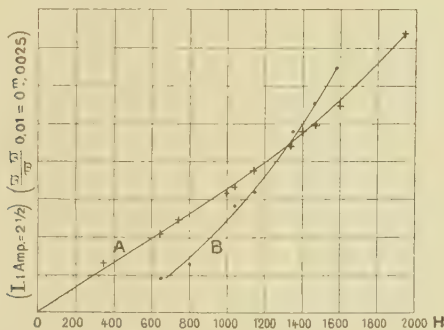
Il me reste à indiquer maintenant comment se faisait la mesure du champ. Je me suis servi, comme toujours, de l'appareil Leduc, mais je ne pouvais songer à faire la mesure du champ immédiatement après chaque expérience,

car il eût fallu chaque fois démonter l'appareil. J'ai donc été contraint d'opérer de la manière suivante : pour chaque expérience, je notais l'intensité I du courant envoyé dans les spires de l'électro-aimant, à l'aide d'un ampèremètre ; puis, toutes les expériences finies, je démontai l'appareil, et, rétablissant entre les bobines de l'électro la distance de $3^{\text{cm}},8$ qui existait antérieurement, j'y plaçai l'appareil Leduc perpendiculairement à l'axe de l'électro.

Reproduisant alors les mêmes intensités I que j'avais employées dans mes expériences, je mesurai le champ correspondant. Il est à remarquer que cette manière d'opérer n'exige pas que l'ampèremètre soit bien gradué, mais seulement qu'il revienne au même point de son échelle quand on reproduit la même intensité, condition à laquelle ces instruments satisfont généralement.

Du reste, j'ai en même temps étalonné l'électro en mesurant les champs qui correspondent aux différentes intensités données par l'ampèremètre ; le résultat est représenté par la courbe A de la *fig. 15*. La régularité de cette courbe prouve que le procédé auquel j'ai eu recours ne comporte pas de graves causes d'erreur.

Fig. 15.



§ IV. *Résultats.* — J'avais d'abord opéré en formant, aux extrémités placées en regard dans l'électro, des pôles

de même nom, de telle sorte que les lignes de force du champ produit fussent perpendiculaires au plan de la soudure fer-cuivre. Mais le champ était sans doute trop faible, et je n'ai pu obtenir aucun résultat appréciable.

J'ai ensuite dirigé les lignes de force du champ suivant l'axe de l'électro, c'est-à-dire parallèlement au plan des soudures. C'est en opérant dans ces conditions que j'ai obtenu les résultats réunis au Tableau suivant. I représente l'intensité du courant envoyé dans l'électro.

I amp.	4,25	5,25	6,7	7,5	9	10,1	11
H	645	800	1035	1150	1350	1490	1590
ρ'	0 ^m , 1925	0, 1963	0, 1946	0, 1953	0, 1939	0, 1925	0, 1946
ρ''	0 ^m , 1904	0, 1932	0, 1880	0, 1877	0, 1828	0, 1794	0, 1791
$\frac{\varpi}{\varpi'}$	0,981	0,973	0,943	0,935	0,904	0,887	0,869
$\frac{\varpi - \varpi'}{\varpi}$	0,0183	0,0267	0,0570	0,0647	0,0954	0,113	0,131

La courbe B (*fig.* 15) a été tracée en portant en abscisses les valeurs de H et en ordonnées celles de $\frac{\varpi - \varpi'}{\varpi}$; elle indique, comme les expériences, une diminution progressive de l'effet Peltier, et qui s'accroît rapidement quand le champ prend des valeurs croissantes.

Je n'ai pas fait d'autres déterminations avec cet appareil pour les raisons suivantes :

1^o Pour de faibles valeurs du champ, la méthode manque de sensibilité. Déjà, pour $I = 4,25$, le déplacement du curseur sur le fil de maillechort, qui définit $\rho' - \rho''$, n'est plus que de 6^{mm}. Il aurait été pourtant intéressant de voir si la courbe B de la *fig.* 15 reste toujours au-dessus de l'axe des abscisses, ou bien passe au-dessous pour de faibles valeurs du champ, ce qui indiquerait, pour ces valeurs, une augmentation de l'effet Peltier par aimantation. Nous verrons tout à l'heure comment cette question peut être résolue.

2^o Pour des valeurs trop grandes de I, le réchauffement

produit par l'électro avait lieu plus tôt, de manière à se confondre avec l'effet thermique dû à la variation d'effet Peltier. Toutefois je pense qu'on aurait pu pousser les déterminations jusqu'à $I = 15$ ou 16 ampères, ce que je n'ai pas fait dans la crainte, d'ailleurs mal fondée, d'abîmer mon électro.

§ V. Au lieu d'étudier directement la variation d'effet Peltier par aimantation, on peut la déduire des mesures de force électromotrice que nous avons faites au Chapitre II.

Occupons-nous d'abord du fer doux. Nous avons trouvé, pour le couple fer-cuivre, l'équation

$$(14) \quad \mathcal{Y} = E' - E = 10^{-7} [125(T - t) + 0,508(T^2 - t^2)] \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428H}.$$

Nous aurons la variation d'effet Peltier par l'équation

$$(9 \text{ bis}) \quad \varpi' - \varpi = \frac{T}{J} \frac{d\mathcal{Y}}{dT}.$$

En exprimant toutes les grandeurs en unités C.G.S, et désignant toujours par T la température centigrade, on trouve

$$(26) \quad \varpi' - \varpi = 10^{-12} \frac{T + 273}{4,17} (125 + 1,016T) \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428H}$$

et cette formule s'applique aussi bien, comme nous l'avons vu, aux variations d'effet Peltier du fer uni à un métal non magnétique quelconque.

Elle indique que $\varpi' - \varpi$ augmente avec T , et qu'il augmente d'abord avec H , pour diminuer ensuite. Le maximum a lieu pour la même valeur de H , qui rend maximum $E' - E$; elle est définie par l'équation

$$0,0428H^2 + 2H - 350 = 0,$$

qui donne

$$H = 93.$$

J'ai formé, et je donne ici, une Table à double entrée

qui donne, d'après l'équation (26), la valeur de $(\pi' - \pi) \cdot 10^4$ pour des valeurs du champ 0, 30, 100, 200, 300, 350 et pour les températures centigrades 0°, 50°, 100°, 200°, 350° :

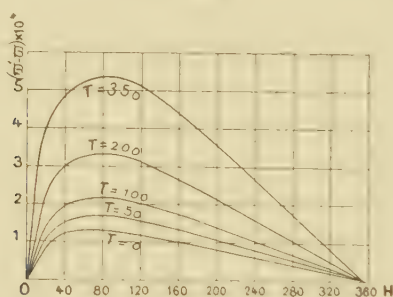
		H.					
		0°.	30°.	100°.	200°.	300°.	350°.
T	0....	0	1,174	1,247	0,826	0,286	0
	50....	0	1,144	1,662	1,101	0,380	0
	100....	0	1,855	2,134	1,414	0,489	0
	200....	0	2,827	3,242	2,155	0,745	0
	350....	0	4,659	5,360	3,552	1,287	0

La *fig.* 16 donne, d'après ce Tableau, les valeurs de

$$(\pi' - \pi) \cdot 10^4.$$

Nous allons maintenant comparer les résultats de la formule (26) avec ceux que l'expérience directe nous a

Fig. 16.



donnés au début de ce Chapitre. Les expériences du Chapitre II, qui ont fourni cette formule, sont faites dans des conditions comparables à ces dernières, car dans toutes deux l'aimantation du fer est longitudinale, et les lignes de force du champ magnétique sont parallèles aux soudures.

Toutefois, nous serons obligés de faire subir à la formule (26) une extrapolation, car elle n'a été établie que

jusqu'à $H = 350$; l'expérience nous en démontrera la légitimité.

Tirons de cette équation les valeurs de $\varpi - \varpi'$ pour les valeurs du champ employées dans les expériences du § IV, à la température de 10° . Pour avoir les valeurs de $\frac{\varpi'}{\varpi} = 1 - \frac{\varpi - \varpi'}{\varpi}$, il suffira de connaître en plus la valeur de ϖ .

En France, on admet généralement la valeur déterminée par M. Le Roux, d'après lequel un courant de $66^{\text{amp}}, 3$ dégage $2^{\text{cal}}, 8$ grammes en passant du fer au cuivre. Il en résulterait, pour la chaleur dégagée en une seconde par le courant 1 C.G.S., $\varpi = 0,00704$.

Mais, depuis, les autres expérimentateurs ont trouvé des nombres plus grands, ce qui tient peut-être à ce qu'ils ont opéré sur des fils de fer, plus faciles à obtenir purs que les lames employées par M. Le Roux. Ainsi, M. Bellati ⁽¹⁾ donne pour l'effet Peltier C. G. S., à la température absolue T,

$$\varpi T = \frac{4,732}{4,17 \times 107} (552,66 - T) T;$$

ce qui, pour 10° C. , donne

$$\varpi = 0,00886.$$

De même, M. Jahn ⁽²⁾ a mesuré l'effet Peltier fer-cuivre à 0° dans le calorimètre à glace de Bunsen, et trouvé $0,00885$, ce qui donne, à 10° , $\varpi = 0,00917$. Enfin, le nombre donné par Tait ⁽³⁾, pour le pouvoir thermo-électrique du fer par rapport au cuivre, donne, pour 10° C. , $\varpi = 0,01034$. Il semble donc que la valeur trouvée par

⁽¹⁾ *Journal de Physique*, 2^e série, t. IX; 1890.

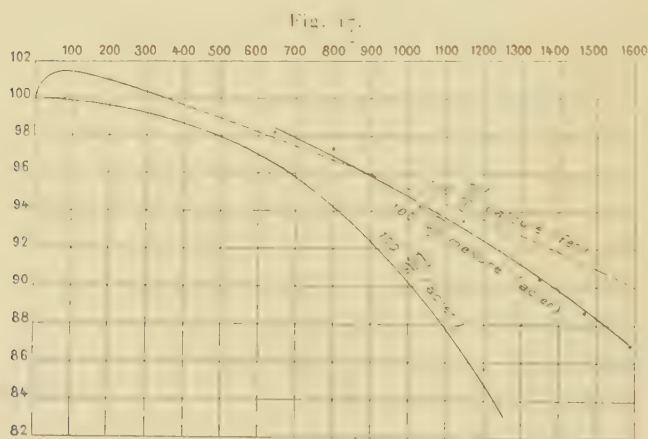
⁽²⁾ *Wied. Annal.*, t. XXXIV, p. 755; 1893. — *J. de Phys.*, 2^e série, t. VIII; 1889.

⁽³⁾ MASCART et JOUBERT, *Électricité et Magnétisme*, t. II, p. 855.

M. Le Roux soit un peu trop faible. Nous prendrons, par exemple, le nombre 0,00886 trouvé par Bellati, celui qui s'est le plus rapproché du résultat de M. Le Roux. Il nous permettra de calculer, à l'aide de la formule (26), les valeurs de $\frac{\sigma'}{\sigma}$, et de les comparer à celles que nous avons obtenues directement. Voici les résultats :

H.	$\sigma - \sigma'$ [d'après (26)].	$\frac{\sigma'}{\sigma}$ calculé.	$\frac{\sigma'}{\sigma}$ observé.
645	0,000186	0,979	0,981
800	0,000286	0,967	0,973
1035	0,000437	0,950	0,943
1150	0,000513	0,941	0,935
1350	0,000644	0,924	0,904
1470	0,000721	0,913	0,887
1590	0,000881	0,901	0,869

La fig. 17 porte les valeurs de $\frac{\sigma'}{\sigma}$ résultant de l'observation et du calcul que nous venons d'indiquer. Ces dernières



sont marquées en traits discontinus dans la partie qui correspond à l'extrapolation de la formule (26). La coïncidence est très suffisante pour les valeurs de H inférieures

à 1100; au delà, elle devient beaucoup moins bonne, ce qui n'a rien que de naturel, étant donné qu'on est alors très éloigné des valeurs de H pour lesquelles la formule a été déterminée.

Je pense qu'on peut conclure de cette comparaison que les deux modes de détermination de l'effet Peltier sont concordants, et même que la formule (14), d'où la relation (26) a été tirée, est suffisamment exacte jusqu'à des valeurs de H voisines de 1100.

Acier doux. — Nous avons trouvé, pour le couple acier-cuivre, la relation

$$E - E' = 10^{-7} [7,471 (T - t) - 0,031 (T - t)^2 + 0,0000495 (T - t)^3] \frac{H^2}{1 - 0,000289 H}.$$

On tire de là, pour $\frac{dE}{dT}$, en unités C.G.S.:

$$\frac{dE}{dT} = 10^{-5} (8,3025 - 0,0658 T + 0,000148 T^2) \frac{H^2}{1 - 0,000289 H}$$

et, par suite,

$$(27) \left\{ \begin{array}{l} \varpi - \varpi' = 10^{-12} \frac{273 + T}{4,17} \\ (8,3025 - 0,0658 T + 0,000148 T^2) \frac{H^2}{1 - 0,000289 H} \end{array} \right.$$

Cette formule est valable jusqu'à $T = 350$ et $H = 1250$. Elle donne pour $(\varpi - \varpi') \cdot 10^4$ les valeurs qui sont inscrites au Tableau suivant les fonctions de H et de T :

		H.				
		250.	500.	750.	1000.	1250.
T	10.....	0,348	1,51	3,69	7,29	12,6
	50.....	0,278	1,21	2,95	5,84	10,1
	100.....	0,191	0,830	2,03	4,01	6,95
	200.....	0,081	0,350	0,860	1,70	2,95
	300.....	0,176	0,760	1,87	3,70	6,42
	350.....	0,346	1,48	3,66	7,25	12,5

On voit, d'après cela, que la variation d'effet Peltier, par aimantation au contact de l'acier et d'un autre métal non magnétique quelconque, augmente toujours avec le champ, mais passe par un minimum quand on fait croître la température. On obtient ce minimum en écrivant

$$\frac{d(\varpi - \varpi')}{dT} = 0,$$

ce qui donne l'équation

$$0,444 T^2 - 50,8 T - 9661 = 0,$$

qui a une racine égale à 215. C'est à cette température que l'effet Peltier présente la moindre sensibilité à l'action du champ magnétique. A 350°, $\varpi' - \varpi$ a repris à très peu près la même valeur qu'à 10°.

Si l'on veut former les valeurs de $\frac{\varpi'}{\varpi}$ pour le contact acier-cuivre, il faut connaître la valeur de ϖ pour l'acier. Nous pouvons le déduire de la formule déjà trouvée :

$$(22) \quad E_{CGS} = 2(T - 13)[548 - (T - 13)].$$

On en tire

$$\varpi = 2,25 \times \frac{10^{-7} \times 273 - T}{4,17} = (574 - 0,5 T) \times 10^{-7}$$

qui, pour $T = 10$, donne

$$\varpi = 0,00750.$$

On trouve ainsi les valeurs suivantes pour $\frac{\varpi'}{\varpi}$:

H.....	0	250	500	750	1000	1250
$\frac{\varpi'}{\varpi}$	1	0,995	0,980	0,951	0,904	0,833

C'est avec ces nombres qu'a été tracée la courbe de la *fig. 17* qui représente 100 $\frac{\varpi'}{\varpi}$ pour l'acier à côté de celles qui se rapportent au fer doux. On voit une fois de plus, par l'examen de ces courbes, combien ces deux corps sont

différents au point de vue de leurs propriétés thermo-électriques.

CHAPITRE IV.

INFLUENCE DE L'AIMANTATION SUR LES EFFETS THOMSON.

§ I. Nous avons défini (Chap. I) deux coefficients σ et λ qui caractérisent deux variétés d'effets Thomson. Étudions successivement l'influence de l'aimantation sur chacun d'eux. Le premier est défini par l'équation

$$(10 \text{ bis}) \quad \sigma = -T \frac{d\Phi}{dT},$$

Φ étant le pouvoir thermo-électrique du métal magnétique considéré par rapport au plomb, à T^0 . Si Φ est exprimé en unités C. G. S., σ est le travail calorifique (en ergs) qui, pour l'unité C. G. S. de courant, correspond à une différence de température égale à 1^0 . Il en résulte que, si E est, comme dans nos formules, en microvolts, le passage d'un coulomb, entre deux points dont les températures diffèrent de 1^0 , donnera lieu à un dégagement de chaleur égal à $10^{-6} \frac{\sigma}{4,17}$, en calories-grammes.

Faisons l'application de la formule (10 bis) à l'acier et au fer.

Pour l'acier, nous avons trouvé

$$\Phi(AP) = -12,82 + 0,0306 T \text{ en microvolts,}$$

$$\Phi'(AP) = \Phi(AP)$$

$$+ 10^{-7} [7,471 - 0,062(T - 13) + 0,0001485(T - 13)^2] \frac{H^2}{1 - 0,000289H}.$$

Il en résulte, pour l'acier neutre,

$$\sigma = -(273 + T) \times 0,0306.$$

Tait avait déjà donné la valeur

$$\sigma = -(273 + T) \times 0,0325,$$

assez voisine de celle-ci.

Pour l'acier placé axialement dans un champ H

$$(28) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma' = \sigma + 10^{-7}(273 + T) \\ \times [0,0582 + 0,000296T] \frac{H^2}{1 - 0,000289H} \end{array} \right.$$

Comme σ et σ' sont négatifs, il résulte de cette expression que la quantité de chaleur transportée électriquement dans l'acier va en diminuant quand on l'aimante. Du reste, ce résultat se voit immédiatement à la seule inspection des diagrammes de la *fig.* 6.

D'après (28) $\frac{\sigma'}{273 + T}$ serait fonction de T; ce fait pourrait sembler contraire à l'hypothèse de Tait, mais il faut remarquer que nous sommes ici dans un cas tout à fait exceptionnel; il n'est pas vrai, en effet, que l'acier placé dans un champ H soit un métal défini; son état dépend encore de la température, puisque, entre 700° et 800°, il perd ses propriétés magnétiques. M. Battelli ⁽¹⁾ a trouvé également que la proportionnalité de l'effet Thomson, à la température absolue, ne se vérifiait pas pour le fer. Pour le fer doux, nous avons trouvé

$$(15) \quad \Phi(\text{FP}) = 14,39 + 0,430T,$$

$$(16) \quad \Phi'(\text{FP}) = \Phi(\text{FP}) - 10^{-7}[125 + 1,016T] \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428H}.$$

Il en résulte

$$\sigma_1 = -(273 + T) \times 0,0430,$$

$$(29) \quad \sigma'_1 = \sigma_1 + 10^{-7} \times 1,016(273 + T) \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428H}.$$

Comme σ_1 et σ'_1 sont négatifs, il en résulte que l'aimantation du fer doux diminue sa chaleur spécifique d'électricité, en valeur absolue, tant que $H < 350$. Elle produit un effet contraire pour des champs compris entre 350 et 1100.

⁽¹⁾ BATTELLI, *Il nuovo Cimento*, t. XXI, p. 228 et *Journal de Physique*, 2^e série, t. VII, p. 588.

Il est possible que les expériences de Trowbridge et Penrose, dont nous avons parlé au début de ce travail, aient été effectuées dans le voisinage de $H = 350$; ainsi s'expliquerait l'insuccès de leurs tentatives pour manifester la variation de σ_1 par aimantation.

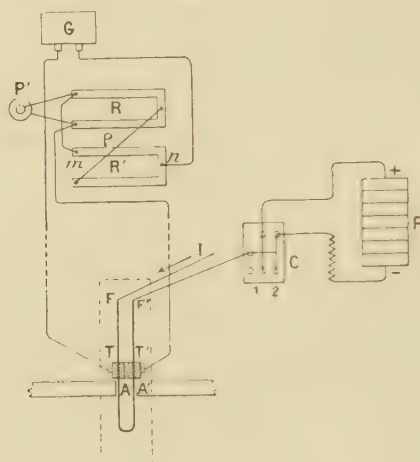
§ II. Quant au coefficient λ , j'ai réussi à mettre en évidence son existence par des expériences directes; mais, auparavant, je vais rappeler les considérations par lesquelles je fus amené à entreprendre ces expériences.

Le fait que la différence de potentiel entre un métal magnétique et un autre non magnétique est modifiée par l'aimantation est maintenant hors de doute, soit que l'on considère ce potentiel à l'état statique, soit qu'on envisage la force électromotrice qui existe aux contacts pendant le passage du courant. Il résulte à la fois des théories données par MM. Janet et Duhem, des expériences que j'ai rappelées au début de cette étude, et de mes propres déterminations. Ceci posé, considérons un circuit formé par du fer, ou tout autre métal magnétique, et un conducteur non magnétique, du cuivre par exemple. Supposons toutes les parties du circuit à une même température, et les deux soudures fer-cuivre infiniment éloignées. La force électromotrice du système $F|C + C|F$ est nécessairement nulle. Mais, si l'on place un aimant au voisinage d'une des soudures, la différence de potentiel $F|C$ correspondante se modifiera par suite de l'aimantation du fer, tandis qu'elle gardera, à l'autre soudure, la même valeur. Le système devrait donc fonctionner comme pile, ce qui est impossible, puisqu'il n'y a aucune absorption permanente d'énergie. Il est donc nécessaire que la variation de potentiel qui se produit à l'une des soudures, du fait de l'aimantation, ait, du même fait, une compensation dans le reste du circuit. Cette compensation se fait nécessairement dans les parties magnétiques, et l'on doit admettre qu'elle consiste en une variation continue de potentiel entre les tranches inégalement aimantées.

J'ai cherché, comme on fait toujours en pareil cas, à caractériser ces variations continues de potentiel par des dégagements ou des absorptions de chaleur.

La *fig.* 18 fera comprendre la disposition de l'appareil employé. La partie essentielle était une bande de fer doux FF' repliée en deux branches parallèles; elle avait 1^{cm} de

Fig. 18.



large, 0^{mm},6 d'épaisseur et 50^{cm} de long; après avoir été travaillée, elle avait été recuite au rouge et refroidie lentement afin de faire disparaître autant que possible l'écrouissage. On pouvait y envoyer le courant d'une forte pile de 4 ou de 6 éléments Grenet à large surface. On faisait passer ainsi dans FF' un courant de 4 à 5 ampères; le commutateur C permettait à volonté d'interrompre ce courant, ou d'en changer le sens.

En A et A' étaient les pôles de noms contraires de deux forts barreaux aimantés, qui déterminaient ainsi dans la lame de fer une aimantation transversale qui allait en diminuant de A vers F et de A' vers F'.

TT' était une pile thermo-électrique dont les deux extrémités étaient en contact chacune avec une des branches

de FF' . Si l'on suppose, par exemple, le courant de P envoyé dans le sens indiqué par la flèche (ce qu'on obtient en appuyant sur la touche n° 1 de C), le courant, en face du pôle T , passera des parties neutres aux parties aimantées, et, en face de T' , des parties aimantées aux parties neutres.

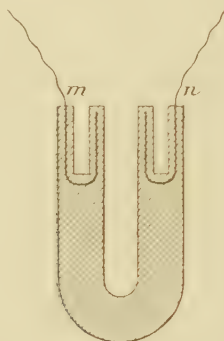
Enfin, les deux pôles de TT' étaient reliés à un circuit comprenant un galvanomètre G et une force électromotrice de compensation, prise sur un Daniell P' à l'aide de deux boîtes de résistances RR' , et suivant la méthode qui a déjà été décrite. G était éloigné autant que possible du courant principal fourni par P , afin de diminuer les déviations qu'y produisent l'ouverture et les changements de sens de ce courant. La lame de fer FF' ainsi que la pile TT' étaient enfermées dans une boîte en bois remplie d'ouate et présentant seulement les ouvertures nécessaires pour laisser passer les barreaux A, A' et les fils conducteurs. Dans ces conditions, lorsque le courant ne passait pas, G restait indéfiniment immobile.

Revenons maintenant, pour terminer cette description, à la pile thermo-électrique TT' ; n'en ayant trouvé aucune convenable au but que je m'étais proposé, je l'avais faite moi-même avec du cuivre et l'alliage d'Edm. Becquerel (10 p. de Bi + 1 p. Sb). Chacun de ses éléments avait la forme d'un fer à cheval (*fig. 19*) dont les deux extrémités présentaient des fentes profondes de 12^{mm} et larges de 1^{mm},5, perpendiculaires au plan de l'élément; autour de ces fentes étaient engagés deux fils de cuivre m et n , repliés comme l'indique la figure. Quatre de ces éléments étaient placés côte à côte, accouplés en tension et séparés par du papier paraffiné; le tout était recouvert d'armatures permettant de le maintenir immobile à l'aide de deux vis de pression. L'ensemble avait une épaisseur de 1^{cm},3; les fentes de chaque côté se correspondaient et l'on y insérait les deux branches de FF' , enveloppé préalablement dans du papier paraffiné.

Voici maintenant comment l'on opérait :

On avait commencé tout d'abord par expérimenter à blanc, c'est-à-dire sans mettre en A et A' les aimants, et par déterminer la position qu'il fallait donner à TT' pour

Fig. 19.



qu'aucun effet n'apparût; puis on mettait les aimants en place et l'on attendait que G fût revenu à son zéro. On envoyait alors le courant de P. Aussitôt se manifestait une petite déviation de G, produite par l'établissement du courant agissant comme un feuillet magnétique, puis apparaissait progressivement une déviation beaucoup plus grande vers la gauche de l'échelle graduée; cette dernière tient à ce que les échauffements produits par F et F' sur T et T' ne sont pas rigoureusement égaux; voici, par exemple, en fonction du temps, les déviations observées pendant la première partie d'une expérience : zéro à 312,8; on ferme le courant de P; G passe à 314, puis baisse régulièrement :

Temps..	0	2'	3'	4'	5'	6'	7'	10'	
Lecture	sur l'échelle.	312,8-314	290	278	270	265	262,1	260,5	258,7

Au bout de dix minutes, G prend une position fixe; on le ramène à son zéro (position pour laquelle il est le plus

sensible) en agissant sur RR' . Puis on change le sens du courant I ; il se produit d'abord instantanément une petite déviation, due au renversement du champ magnétique produit par I ; cette déviation est suivie par une autre, qui se produit lentement et met de trois à cinq minutes à atteindre son effet; elle est de 3^{mm} à 4^{mm} sur l'échelle, et par suite on peut l'observer avec certitude, puisqu'on peut apprécier sans difficulté le cinquième de millimètre. Si l'on renverse le courant de nouveau, on observe en sens contraire les mêmes déviations: ainsi se trouve caractérisé l'effet que nous cherchons à mettre en évidence.

En effet, le travail calorifique, dégagé aux deux pôles T, T' de la pile par seconde, est en T

$$Q = R I^2 + \lambda I dH;$$

en T'

$$Q' = R' I^2 - \lambda I dH,$$

et la déviation Δ produite sur G , qui est proportionnelle à la différence des températures de T et T' , l'est sensiblement aussi à la différence des quantités de chaleur reçues par ces deux pôles:

$$\Delta = K(Q - Q') = K[(R - R') I^2 + 2 \lambda I dH].$$

Si l'on renverse le courant, les quantités de chaleur dégagées en T et T' sont

$$Q_1 = R I^2 - \lambda I dH$$

$$Q'_1 = R' I^2 + \lambda I dH$$

et la déviation Δ_1 a pour valeur

$$\Delta_1 = K(Q_1 - Q'_1) = K[(R - R') I^2 - 2 \lambda I dH].$$

Par suite

$$\delta = \Delta - \Delta_1 = 4 K \lambda I dH.$$

J'ai pu faire ainsi quatre séries d'expériences, et, dans chacune d'elles, j'ai renversé plusieurs fois le sens du courant. Je désignerai par δ la déviation produite par le

renversement du courant, abstraction faite de la petite déviation initiale instantanée, et comptée vers la droite de la règle divisée; par 1 le sens du courant de P indiqué par la flèche de la fig. 18, par 2 le sens inverse.

Première série (opéré avec quatre éléments Grenet).

— Je n'en ai pas conservé les résultats numériques; le courant fut renversé six fois; quand on produisait le courant 1, il y avait déviation vers la gauche; le rétablissement du courant 2 produisait une déviation vers la droite de trois divisions en moyenne. Or, une déviation vers la droite correspond à un échauffement plus grand en T' qu'en T, comme on s'en rend compte directement, après l'expérience faite, en approchant de T' un corps chaud.

Deuxième série. — Elle est faite, comme les suivantes, avec six éléments Grenet :

Sens du courant.	1	2	1	2	1	2
δ.....	»	+2,8	—1,5	+5	—2,1	+6

Troisième série :

Heure.....	2 ^h 1 ^m	2 ^h 3 ^m	2 ^h 3 ^m	2 ^h 4 ^m	2 ^h 5 ^m	2 ^h 5 ^m	3 ^h 1 ^m
Sens du courant.	1	2	1	2	1	2	1
δ.....	»	+3,4	—3,6	+3,1	—3,5	+3,2	—3,5

Quatrième série :

Heure.....	3 ^h 25 ^m	3 ^h 30 ^m	3 ^h 37 ^m	3 ^h 45 ^m
Sens du courant.	1	2	1	2
δ.....	»	+2,3	—3	+2,1

Les quatre séries d'expériences concordent donc pour indiquer le résultat suivant :

Le courant marchant dans le sens 1, l'échauffement est plus grand en T qu'en T'; quand il passe dans le sens 2, l'échauffement est plus grand en T' qu'en T.

Donc il y a *dégagement de chaleur*, en vertu de l'effet que nous étudions, *quand le courant passe des régions*

neutres aux régions aimantées. Autrement dit, λ est négatif pour le fer aimanté transversalement.

§ III. D'un autre côté, nous avons établi au Chapitre I l'équation

$$(11) \quad \lambda = -(273 + T) \frac{\partial^2 \psi}{\partial H \partial T};$$

elle nous permettra de trouver la valeur de λ pour le fer et l'acier aimantés longitudinalement.

En effet, pour le fer, on a

$$\psi = -10^{-7} (125 T + 0,508 T^2) \frac{H(350 - H)}{1 + 0,0428 H}.$$

Il en résulte

$$(30) \quad \lambda = -10^{-7} (T + 273) (125 + 1,016 T) \frac{0,0428 H^2 + 2 H - 350}{(1 + 0,0428 H)^2}.$$

Le trinome $0,0428 H^2 + 2 H - 350$ a une racine négative et une positive égale à 70.

D'autre part, les termes qui dépendent de T sont tous positifs. Donc λ est négatif si $H > 70$ et positif si $H < 70$.

Un calcul analogue, appliqué à l'acier, donnait pour le coefficient λ_1 , relatif à l'aimantation longitudinale,

$$(31) \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 = -10^{-7} (T + 273) \\ \quad \times (8,3025 - 0,0658 T + 0,000148 T^2) \\ \quad \times \frac{H(2 - 0,000289 H)}{(1 - 0,000289 H)^2}, \end{array} \right.$$

expression qui, dans le cas ordinaire, est toujours négative; donc il y aura toujours absorption de chaleur quand le courant passera de l'acier aimanté longitudinalement à l'acier neutre, et dégagement de chaleur dans le cas contraire.

§ IV. *Discussion des expériences de Sir W. Thomson.*

— Les signes que nous avons déterminés pour λ dans les deux paragraphes précédents mènent, comme réciproques, aux propositions suivantes :

1° Soit un fil de fer doux faisant partie d'un circuit

placé dans un champ non uniforme et qui l'aimante longitudinalement. Si l'on chauffe un de ses points dans une région où le champ est supérieur à 70 C. G. S., il se produit un courant allant à travers la partie chaude dans le sens où le champ va en décroissant ;

2° Si le champ est inférieur à 70 au point chauffé, le courant produit ira à travers la partie chaude dans le sens où le champ va en croissant ;

3° Si le fil de fer doux est aimanté transversalement, le courant ira à travers la partie chaude dans le sens où le champ va en décroissant ;

4° S'il s'agit d'un fil d'acier aimanté longitudinalement, le courant ira à travers la partie chaude dans le sens où le champ va en décroissant.

Ces résultats appellent la comparaison avec ceux qu'a obtenus Sir W. Thomson, et que nous avons rappelés dans notre Introduction historique.

a. Fer aimanté longitudinalement. — Nos résultats concordent avec celui de Sir W. Thomson, à condition d'admettre que, dans l'expérience de ce dernier, la valeur du champ au point chauffé était inférieure à 70 C. G. S. Or c'est ce qui avait lieu bien certainement. En effet, d'après les dimensions de la bobine magnétisante (3 pouces de long, portant 220 tours de fil enroulé sur 3 couches), le champ dans son intérieur était $H = 34I$; or I , d'après les dimensions du fil, ne pouvait guère être supérieur à 2 ampères, ce qui donne $H = 70$ dans la bobine même ; H devait être encore beaucoup plus petit au point chauffé, situé en dehors de la bobine, celui-ci ayant un très faible diamètre.

b. Fer aimanté transversalement. — Nos conclusions sont d'accord avec les expériences de Sir W. Thomson.

c. Acier aimanté. — Il y a ici un désaccord absolu entre nos conclusions, tirées du signe de λ_1 , et l'expérience de Sir W. Thomson. Peut-être ce désaccord tient-il

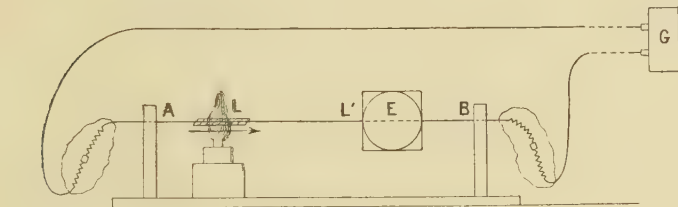
à ce que les conditions ne sont pas les mêmes, Sir W. Thomson opérant sur le magnétisme rémanent de l'acier trempé, tandis que nos expériences se rapportent au magnétisme total de l'acier doux.

En tout cas, l'opposition que Sir W. Thomson cherche à manifester entre l'aimantation longitudinale et l'aimantation transversale, celle-ci produisant toujours des effets contraires à celle-là, ne semble pas justifiée. J'ai déjà cité (Chap. II, § 7) une autre expérience où les deux modes d'aimantation produisaient, sur l'acier, des modifications de même sens, mais inégales.

Enfin, j'ai réussi à montrer, par une expérience directe, que le signe de λ pour le fer est différent suivant le champ où est placé le point considéré, de telle sorte que les deux modes d'aimantation du fer peuvent donner, suivant les conditions, des effets de même sens ou de sens contraire.

Pour manifester cette proposition, j'employais (*fig. 20*) un fil de fer bien doux, de $0^{\text{mm}},5$ environ de diamètre, et

Fig. 20.



long de 2^{m} . Il était serré à l'aide de pinces en bois dans deux supports A et B fixés sur une planche qui pouvait glisser sur des rails perpendiculaires à l'axe d'un électro-aimant E. Les deux extrémités du fil de fer étaient reliées à des fils de cuivre aboutissant à un galvanomètre G (le même que pour les expériences précédentes); on avait pris les précautions nécessaires pour qu'il ne se produisît pas de courants thermo-électriques aux contacts fer-cuivre, en les entourant d'ouate.

L'électro E était muni de deux larges joues déjà employées au Chapitre II, distantes de 2^{cm} , 2, et l'on y envoyait un courant de 7 ampères. Le champ entre les joues était de 1240; mais, à 50^{cm} en dehors de l'électro, il était à peine sensible (peut-être 10 C. G. S.). Le fil AB passait entre les pièces polaires, et l'on pouvait l'entraîner avec le chariot, de façon à y amener successivement ses différentes parties.

On choisissait, par tâtonnement, une région du fil ne donnant pas de courant dans le circuit lorsqu'on la chauffait, l'électro étant au repos; cette condition est très difficile à réaliser; le point que j'ai choisi donnait encore une petite déviation à gauche sur l'échelle du galvanomètre. Ce point du fil était entouré de clinquant, de façon à régulariser l'action de la flamme et à l'empêcher de rougir le fil. Cela fait, on excitait le champ de E; si l'on chauffait le point choisi, la lampe étant en L, à 20^{cm} environ de E, on observait une déviation assez forte de G vers la gauche. Elle correspondait à un courant allant dans le sens de la flèche, c'est-à-dire des parties neutres vers les parties aimantées à travers la soudure chaude.

Si ensuite on faisait glisser le fil avec le chariot, de façon à amener L en L' tout contre l'électro, il se produisait une déviation très forte vers la droite, c'est-à-dire que le courant produit se dirigeait des parties aimantées aux parties neutres, à travers la soudure chaude.

J'ai répété cette expérience un grand nombre de fois, et toujours obtenu le même résultat; seulement, il faut prendre soin de ne pas chauffer trop fort, car, si le fil arrive au rouge, le sens de la déviation peut changer brusquement.

Les résultats de cette expérience concordent avec ceux que nous avait indiqués la discussion de l'équation (30).

CONCLUSIONS.

Voici, en résumé, quels sont les principaux faits établis dans le présent Travail :

1° J'ai montré que la position du fer et de l'acier, dans la série thermo-électrique, était modifiée par l'aimantation, et j'ai évalué ces modifications en fonction du champ magnétique et de la température ;

2° J'en ai déduit, comme conséquences, les variations qu'éprouve, avec le champ, l'effet Peltier, au contact du fer ou de l'acier à un autre métal non magnétique, et les variations qu'éprouve la chaleur spécifique d'électricité ; ces résultats ont été corroborés, pour le fer doux, par une étude expérimentale des variations de l'effet Peltier ;

3° J'en ai déduit également l'existence d'une autre variété d'effet Thomson qui se produit, sans variations de température, entre deux parties inégalement aimantées d'un même corps magnétique. Cette conséquence du calcul a été vérifiée, en ce qui concerne le fer doux, par des expériences directes ;

4° J'ai appliqué les résultats, établis pour cette nouvelle forme d'effet Thomson, à l'explication de certaines expériences de Sir W. Thomson, et montré que l'interprétation qu'il avait donnée de ces expériences n'était pas complètement exacte.

Vu et approuvé :

Paris, le 20 mai 1895.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 20 mai 1895.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,
GRÉARD.

SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTE.

Dissociation.

Vu et approuvé :

Paris, le 20 mai 1895.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

G. DARBOUX.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 20 mai 1895.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

GRÉARD.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET FILS.

22275 Quai des Grands-Augustins, 55.
